

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
“ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ”

Б.М. Горкунов, С.Г. Львов, А.А. Тищенко

# **ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Учебное пособие

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета,  
протокол № 1 от 04.06.2014 г.

Харьков  
НТУ «ХПИ»  
2014

УДК 621.317.33

ББК 31.221

Г - 69

Рецензент: *О.Б. Богаєвський*, д-р техн. наук, проф., ХНАДУ  
*В.Б. Большаков*, д-р техн. наук, с.н.с., ННЦ "Інститут метрології"

Автори: *Б.М. Горкунов*, д-р техн. наук, проф.;  
*С.Г. Львов*, к. техн. наук, доц.;  
*А.А. Тищенко*, к. техн. наук

У навчальному посібнику розглянуто класифікацію компонентів електричних кіл із зосередженими параметрами, наведені основні методи вимірювання параметрів RLC; розглядаються практичні питання визначення параметрів електричних кіл різними вимірювальними приладами, а також в посібник включено задачі з розрахунку параметрів електричних кіл.

Призначено для студентів напряму підготовки «Приладобудування».

Измерение параметров электрических цепей: учебн. пособ./ Горкунов Б.М., Львов С.Г., Тищенко А.А. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – 128 с. – На рус. яз.

ISBN 978-617-05-0111-0

В учебном пособии рассмотрена классификация компонентов электрических цепей с сосредоточенными параметрами, приведены основные методы измерения параметров RLC; рассматриваются практические вопросы определения параметров электрических цепей различными измерительными приборами, а так же в пособие включены задачи по расчету параметров электрических цепей.

Предназначено для студентов направления подготовки «Приборостроение».

Ил. 71. Табл. 23. Библиогр. 7 назв.

УДК 621.317.33

ББК 31.221

ISBN 978-617-05-0111-0

© Б.М. Горкунов, С.Г. Львов,  
А.А. Тищенко, 2014 г.

## ВСТУПЛЕНИЕ

При определенных допущениях электрическую цепь можно рассматривать как цепь, состоящую из нескольких идеальных элементов – сосредоточенных постоянных, параметры которых можно считать размещенными в пределах только одной ветви, соединенной с остальной частью цепи узлами.

Электрическая цепь представляет собой совокупность соединенных друг с другом источников электрической энергии и нагрузок, по которым может протекать электрический ток.

При этом ток изменяется только при переходе через узел.

В цепях с сосредоточенными постоянными широко используются линейные компоненты общего применения: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т. п.

Реальный пассивный элемент электрической цепи иногда представляет собой достаточно сложный объект как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами. Однако в большинстве случаев комплексное сопротивление можно представить эквивалентной схемой замещения, включающей в себя емкость или индуктивность, которые последовательно либо параллельно соединены с активным сопротивлением. Передача электрической энергии через такую цепь сопровождается сложными процессами образования электрических и магнитных полей и преобразования энергии, происходящими в каждом компоненте или участке цепи. Так, преобразование электрической энергии в тепловую происходит в активном сопротивлении, энергии электрического тока в энергию магнитного поля в индуктивности, электростатическое поле образуется в емкости. Для оценки электрических свойств цепи необходимо измерить параметры ее компонентов [1–7].

Основными измерительными задачами, решаемыми с помощью приборов для измерения параметров линейных компонентов цепей с сосредоточенными постоянными, являются:

- контроль и разбраковка линейных компонентов при их производстве;
- осуществление входного контроля на предприятиях, использующих линейные компоненты в качестве покупных изделий;
- проведение измерений при настройке и регулировке узлов радиоэлектронной аппаратуры, а также при отыскании в ней неисправностей;
- исследование электрических свойств материалов;
- измерение неэлектрических величин (температура, давление и др.)

- при наличии соответствующих датчиков;
- использование в системах контроля и управления технологическими и производственными процессами.



# 1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ ЦЕПЕЙ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

## 1.1. Общие сведения

Компоненты электрических цепей характеризуются рядом параметров, которые по роду единиц физических величин подразделяются на основные, зависящие от основных единиц и характеристик среды (различные скалярные величины), и производные, выражаемые через основные параметры и частоту (частично безразмерные величины).

К основным параметрам компонентов электрических цепей с сосредоточенными постоянными относятся электрическая емкость конденсаторов, сопротивление резисторов, индуктивность (взаимоиндуктивность) катушек. Производными параметрами являются тангенс угла потерь, добротность, постоянная времени и т. д.

Кроме того, основные и производные параметры разделяются по номинальному значению на главные и остаточные (или сопутствующие). Главный параметр соответствует виду компонента. Например, главным параметром конденсатора является емкость, резистора – сопротивление, катушки индуктивности – индуктивность.

К остаточным параметрам, наличие которых вызвано несовершенством конструкции компонентов и характеристик применяемых материалов, можно отнести собственную емкость и активное сопротивление катушек индуктивности, индуктивность резисторов и потери конденсаторов. По сравнению с главным параметром остаточные параметры должны иметь возможно меньшие значения. Наличие остаточных параметров приводит к изменению главного параметра компонента электрической цепи по сравнению со значением, соответствующим виду компонента.

С учетом остаточных параметров конденсатор, резистор или катушку индуктивности можно характеризовать некоторыми эффективными значениями емкости, сопротивления и индуктивности, которые зависят от частоты. Поэтому эффективные параметры необходимо измерять на рабочих частотах. В зависимости от требуемой точности и целей эксперимента приходится измерять как главные, так и эффективные параметры. Если требуемая точность измерения невелика, то их можно считать одинаковыми. Одной и той же электрической цепи в зависимости от условий ее использования могут соответствовать разные схемы замещения, поэтому параметры этих схем нельзя использовать для оценки и сравнения электрических цепей. Необходимо установить общие характеристики,

присущие электрическим цепям при определенном виде энергетического воздействия.

Исследование свойств линейных компонентов, представляющих собой электрические двухполюсники, производится при воздействии на них синусоидального тока, а в качестве обобщенных характеристик цепи используются комплексное сопротивление или комплексная проводимость.

Эквивалентные схемы линейных компонентов могут быть представлены в виде последовательной цепи (рис. 1.1 а) или параллельной (рис. 1.1 б) схемы замещения [2].

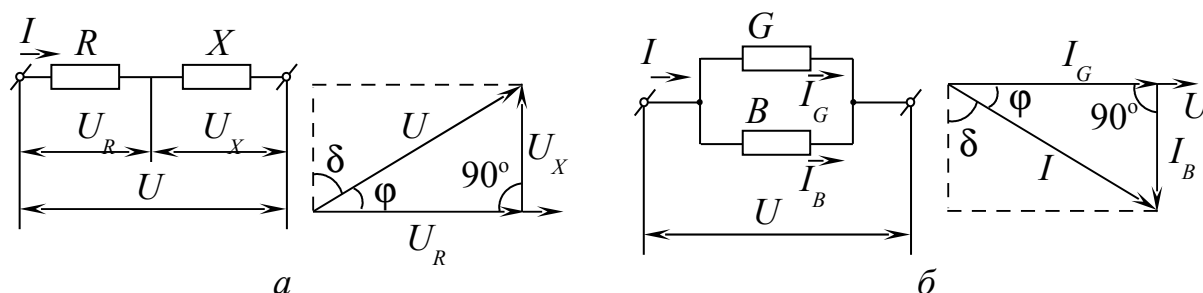


Рисунок 1.1 – Последовательная схема замещения с векторной диаграммой напряжений для комплексного сопротивления (а) и параллельная схема замещения с векторной диаграммой токов для комплексной проводимости (б).

При последовательной схеме замещения комплексное сопротивление представляется в виде последовательного соединения активного  $R$  и реактивного  $X$  сопротивлений и определяется как отношение комплексной амплитуды напряжения  $U$ , действующего на зажимы двухполюсника, к комплексной амплитуде тока  $I$ , протекающего через него:

$$Z = U/I. \quad (1.1)$$

Из векторной диаграммы для последовательной схемы замещения видно, что напряжение  $U$  можно разложить относительно тока  $I$  на синфазную  $U_R$  и квадратурную (сдвинутую на  $90^\circ$ )  $U_X$  составляющие:

$$U = U_R + jU_X. \quad (1.2)$$

Тогда комплексное сопротивление

$$Z = R \pm jX, \quad (1.3)$$

где  $R = U_R/I$ ;  $X = U_X/I$ ;  $j$  – множитель, показывающий, что угол между током  $I$  и напряжением  $U$  составляет  $90^\circ$ .

В полярной системе координат

$$Z = |Z| e^{\pm j\varphi}, \quad (1.4)$$

где

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (1.5)$$

$$\varphi = \arctg(X/R), \quad (1.6)$$

причем, из рис. 1.1 видно, что

$$R = |Z| \cos \varphi; \quad (1.7)$$

$$X = |Z| \sin \varphi. \quad (1.8)$$

Комплексная проводимость  $Y$  является величиной, обратной комплексному сопротивлению:

$$Y = I/U, \quad (1.9)$$

а схема замещения представляет собой параллельное соединение активной  $G$  и реактивной  $B$  проводимости.

В общем виде комплексную проводимость можно записать следующим образом:

$$Y = G \pm jB. \quad (1.10)$$

Любой из компонентов общего применения может быть представлен как последовательной, так и параллельной схемой замещения. Эти схемы эквивалентны, что видно из равенства

$$Z = 1/Y, \quad (1.11)$$

из которого можно установить связь между параметрами схем:

$$\begin{aligned} R &= G/(G^2 + B^2); \\ X &= -(\pm B/(G^2 + B^2)); \\ G &= R/(R^2 + X^2); \end{aligned} \quad (1.12)$$

$$B = -(\pm X/(R^2 + X^2)). \quad (1.13)$$

Таким образом, используя формулы (1.12) и (1.13) при известных параметрах одной из схем замещения можно рассчитать параметры другой схемы.

Активное сопротивление  $R$  определяет способность цепи к необратимым преобразованиям энергии (потери энергии). Реактивное сопротивление  $X$  отражает электромагнитные явления и является мерой способности системы запасать энергию.

Для количественной оценки качества компонентов используются относительные величины составляющих комплексного сопротивления или комплексной проводимости. Для компонента, обладающего как активным, так и реактивным сопротивлением, вводится понятие добротность  $Q$ , которая определяет отношение запасенной и рассеиваемой энергий. Численно добротность равна умноженному на  $2\pi$  отношению максимальной мгновенной энергии, запасенной за один период, к энергии, рассеянной за один период.

Обычно понятие добротности применяется к схемам с индуктивностями. Для схем с емкостями применяют аналогичное понятие – тангенс угла потерь  $\text{tg } \delta$ , причем

$$\text{tg } \delta = R/X = G/B. \quad (1.14)$$

Из векторных диаграмм, представленных на рис. 1.1а и 1.1б,

$$\text{tg } \delta = U_R/U_X = I_G/I_B = \text{ctg } \varphi = \text{tg } (90^\circ - \varphi),$$

т.е. угол  $\delta$  является дополнительным к углу  $\varphi$ .

$$Q = 1/\text{tg } \delta = \text{tg } \varphi = X/R = B/G. \quad (1.15)$$

Подставив значения  $\text{tg } \delta$  и  $Q$  в (1.3) и (1.10), получим значения комплексного сопротивления и проводимости в следующем виде:

$$Z = X(R/X + j) = X(\text{tg } \delta + j) = X(1/Q + j); \quad (1.16)$$

$$Y = B(G/B + j) = B(\text{tg } \delta + j) = B(1/Q + j). \quad (1.17)$$

Из (1.16) и (1.17) видно, что тангенс угла потерь и добротность могут

быть использованы для оценки активной составляющей комплексного сопротивления или комплексной проводимости.

Для оценки относительной величины реактивной составляющей резисторов используют тангенс угла фазового сдвига  $\operatorname{tg} \delta$ , определяемый из (1.15). С учетом этого параметра комплексное сопротивление и проводимость можно представить в виде:

$$Z = R(1 \pm jX/R) = R(1 \pm j \operatorname{tg} \varphi); \quad (1.18)$$

$$Y = G(1 \pm jB/G) = G(1 \pm j \operatorname{tg} \varphi). \quad (1.19)$$

Реактивная составляющая может оцениваться постоянной времени

$$\tau = \pm (\operatorname{tg} \varphi) / \omega. \quad (1.20)$$

Таким образом, задача измерения комплексного сопротивления или комплексной проводимости сводится к определению любой пары величин, определяющих их активную и реактивную составляющие.

## 1.2. Характеристики электрических конденсаторов

Основными параметрами, характеризующими реальные конденсаторы, являются их электрическая емкость и угол потерь.

В электронных устройствах применяются конденсаторы многих типов и различных назначений. Возможные значения их емкостей лежат примерно в пределах от 1 пФ до 1000 мкФ. В области высоких и сверхвысоких частот объектами измерений могут также явиться весьма малые межэлектродные емкости электронных приборов и паразитные емкости между различными элементами схемы (емкости монтажа).

В каждом конденсаторе, включенном в электрическую цепь, имеют место потери энергии, возникающие главным образом в материале диэлектрика, а также вследствие несовершенства изоляции между выводами. С учетом потерь эквивалентную схему конденсатора можно представить в двух вариантах: либо в виде емкости  $C$ , включенной последовательно с сопротивлением потерь  $R_n$  (рис. 1.2а), либо в виде той же емкости  $C$ , шунтированной сопротивлением утечки  $R_y$  (рис 1.2б).

Из векторной диаграммы на рис. 1.2, справедливой для обоих вариантов эквивалентных схем, следует, что в цепи с конденсатором из-за наличия потерь фазовый сдвиг  $\varphi$  между током  $I$  и напряжением  $U$  всегда

меньше  $90^\circ$ . Потери в конденсаторе обычно характеризуют углом потерь  $\delta = 90 - \varphi$ , определяемым в соответствии с обозначениями на рис. 1.2, *а* и 1.2, *б* из формул [2, 3]:

для последовательной схемы замещения

$$\operatorname{tg} \delta = U_{\pi} / U_C = 2\pi f C R_{\pi}, \quad (1.21)$$

для параллельной схемы замещения

$$\operatorname{tg} \delta = I_y / I_C = 1 / (2\pi f C R_y), \quad (1.22)$$

где  $f$  – частота тока в цепи конденсатора.

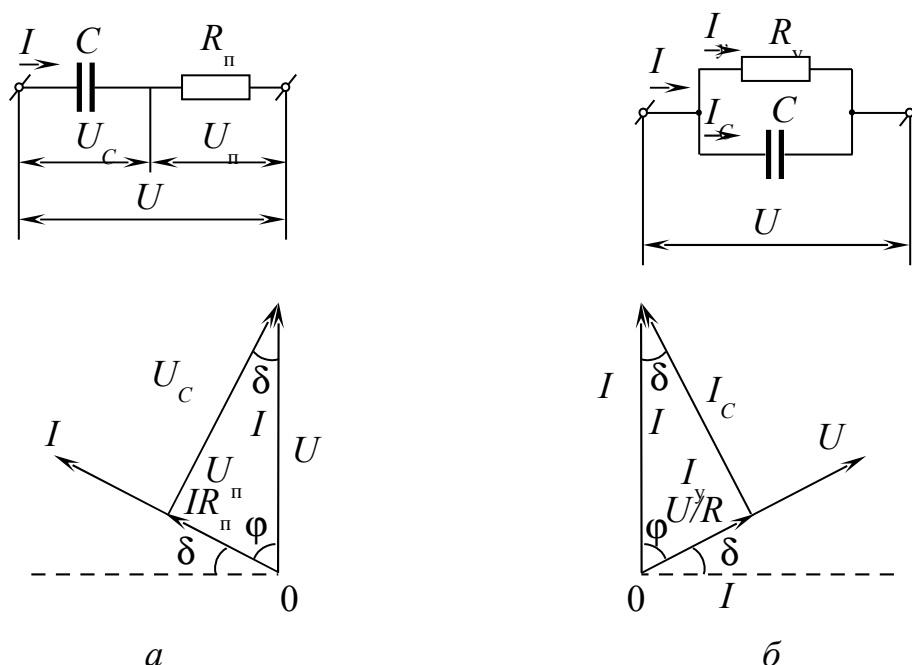


Рисунок 1.2 – Схемы замещения и векторные диаграммы конденсаторов:  
*а* – последовательная, *б* – параллельная.

При переходе от одной эквивалентной схемы к другой для пересчета значения активного сопротивления пользуются формулой

$$R_y = \frac{1}{(2\pi f C)^2 R_{\pi}}. \quad (1.23)$$

Реальные конденсаторы в достаточно широком диапазоне частот имеют малый  $\operatorname{tg} \delta$ , и поэтому их емкости независимо от принятой схемы

замещения будут иметь приблизительно одно и то же значение.

Потери в конденсаторе иногда выражают коэффициентом мощности  $\cos \varphi$  или током утечки  $I_y$ , определяемым при стандартных условиях. Для большинства конденсаторов потери очень малы ( $\operatorname{tg} \delta < 0,001$ ), поэтому можно считать

$$\operatorname{tg} \delta \approx \delta \approx \sin \delta \approx \sin (90^\circ - \varphi) = \cos \varphi. \quad (1.24)$$

Наибольшие потери имеют место в электролитических и бумажных конденсаторах, применение которых в основном ограничивается областью низких частот.

Допустимая погрешность измерения емкостей конденсаторов зависит от области применения последних. Емкость конденсаторов, входящих в состав колебательных систем, должна определяться особенно тщательно, с погрешностью, по крайней мере, 1%. При выборе конденсаторов блокировочных, разделительных, связи и т.п. обычно допускается значительный (до 20–50%) разброс емкостей и измерение их можно производить простейшими методами.

При некоторых методах измерений потери в конденсаторе определяются одновременно с измерением его емкости. При этом следует иметь в виду, что с повышением частоты потери заметно возрастают (что соответствует увеличению значения  $R_n$  и уменьшению  $R_y$ ), тогда как емкость  $C$  практически не зависит от частоты. На очень высоких частотах возможно заметное возрастание действующей (измеренной по приборам) емкости конденсаторов из-за влияния индуктивности обкладок и подводных проводов.

Параметры конденсатора ( $C$ ,  $R_n$ ,  $R_y$ ,  $\operatorname{tg} \delta$ ) зависят от внешних условий его работы – температуры, влажности, атмосферного давления, а также от приложенного к нему напряжения и различны для разных типов конденсаторов. Поэтому в ответственных случаях испытание конденсаторов осуществляется не только на их рабочих частотах, но и в условиях, близких к эксплуатационным.

Типы некоторых промышленных конденсаторов и их характеристики приведены в таблице П.1.

Промышленностью также выпускаются меры электрической емкости. Мерами емкости служат конденсаторы постоянной и переменной емкости и магазины емкости. Конденсаторы выполняются плоскими или цилиндрическими, с воздушным или твердым диэлектриком. Вид диэлектрика зависит от номинального значения емкости. Конденсаторы с

воздушным диэлектриком имеют емкость от 1 до 1000 пФ. В конденсаторах емкостью свыше 1000 пФ при меняется слюдяной диэлектрик, а при емкостях свыше  $10^6$  пФ – диэлектрик из полимерной пленки.

Для плавного изменения емкости служат конденсаторы переменной емкости. Они же могут применяться в магазинах емкости в качестве младшей декады в сочетании с декадами, которые имеют ступенчатое изменение емкости.

К мерам емкости предъявляются следующие требования: минимальная зависимость емкости от температуры, времени и частоты, малый тангенс угла диэлектрических потерь, высокое сопротивление изоляции и достаточно высокая электрическая прочность изоляции.

Выпускаемые промышленностью однозначные и многозначные меры емкости имеют номинальные значения емкости от 0,001 пФ до 0,01 Ф. Погрешность аттестации мер при выпуске из производства от 0,01 до 0,6 %. Магазины емкости с номинальными значениями более  $10^6$  пФ могут иметь разные классы точности для разных декад. Предел допускаемой основной погрешности магазина выражается в виде формулы:

$$\delta = \pm k \left( 1 + 0,8m \frac{C_1}{C} \right), \quad (1.25)$$

где  $\delta$  – относительная погрешность емкости, установленной на магазине, %;  $k$  – численное обозначение класса точности;  $m$  – число декад магазина;  $C_1$  – номинальное значение емкости одной ступени низшей декады, пФ;  $C$  – емкость, установленная на магазине.

Допускаемая погрешность конденсатора переменной емкости связана с его классом точности выражением

$$\delta = \pm k \frac{C_{\max}}{C}, \quad (1.26)$$

где  $C_{\max}$  – наибольшее значение емкости конденсатора, пФ; остальные обозначения – те же, что и в предыдущей формуле.

Стандартом установлено также максимально допускаемое значение начальной емкости для многозначных мер.

Тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  характеризует влияние остаточных параметров на емкость конденсатора;  $\operatorname{tg} \delta$  в значительной



степени зависит от проводимости диэлектрика, а также от переходных сопротивлений контактов.

Основные характеристики мер емкости приведены в таблице П.2.

### 1.3. Характеристики индуктивностей

Основным параметром, характеризующим контурные катушки, дроссели, обмотки трансформаторов является индуктивность  $L$ . В высокочастотных цепях применяются катушки с индуктивностью от сотых долей микрогенри до десятков миллигенри; катушки, используемые в низкочастотных цепях, имеют индуктивность до сотен и тысяч генри. Измерение индуктивности высокочастотных катушек, входящих в состав колебательных систем, желательно производить с погрешностью не более 5%; в большинстве других случаев допустима погрешность измерения до 10 - 20 %.

Каждая катушка помимо индуктивности  $L$ , характеризуется также собственной (межвитковой) емкостью  $C_L$  и активным сопротивлением потерь  $R_L$ , распределенными по ее длине. Условно считают, что  $L$ ,  $C_L$  и  $R_L$  сосредоточены и образуют замкнутую колебательную цепь (рис. 1.3) с собственной резонансной частотой

$$f_L = 1 / (2\pi \sqrt{LC_L}). \quad (1.27)$$

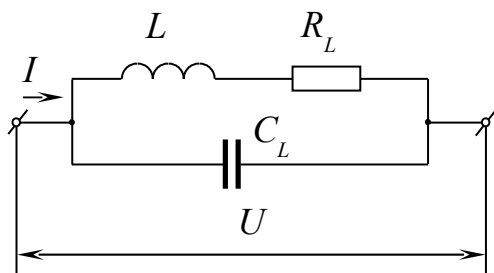


Рисунок 1.3 – Эквивалентная схема катушки индуктивности.

Вследствие влияния емкости  $C_L$  при измерении на высокой частоте  $f$  определяется не истинная индуктивность  $L$ , а действующее, или динамическое, значение индуктивности [2, 3]

$$L_d = \frac{L}{1 - (2\pi f)^2 LC_L} = \frac{L}{1 - f^2 / f_L^2}, \quad (1.28)$$

которое может заметно отличаться от индуктивности  $L$ , измеренной на низких частотах.

С повышением частоты возрастают потери в катушках индуктивности, обусловленные поверхностным эффектом, излучением энергии, токами смещения в изоляции обмотки и каркасе, вихревыми токами в сердечнике. Поэтому действующее активное сопротивление  $R_d$  катушки может заметно превышать ее сопротивление  $R_L$ , измеренное омметром или мостом постоянного тока.

Эквивалентную схему катушки индуктивности можно свести к эквивалентной последовательной или параллельной схеме (рис. 1.4).

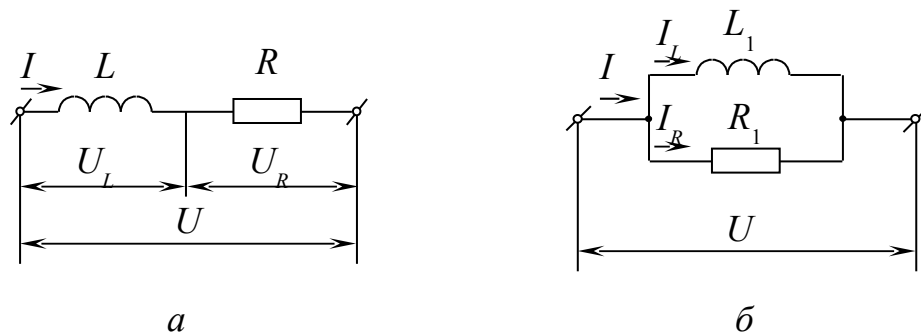


Рисунок 1.4 – Эквивалентные схемы катушки индуктивности:  
а – последовательная, б – параллельная.

Переход между параметрами этих схем осуществляется с помощью выражений:

$$L_1 = L \left( 1 + \frac{1}{Q^2} \right); \quad (1.29)$$

$$R_1 = R(1 + Q^2). \quad (1.30)$$

При этом для последовательной схемы замещения

$$Q = \frac{\omega L}{R}, \quad (1.31)$$

а для параллельной схемы замещения

$$Q = \frac{R_1}{\omega L_1} \quad (1.32)$$

Переход от одной схемы к другой возможен только при неизменной частоте, поскольку  $Q$  зависит от частоты.

При правильном выборе последовательной или параллельной эквивалентной схемы (рис. 1.4) измеренное значение индуктивности оказывается близким к действительному. Когда индуктивность велика, ее реактивное сопротивление тоже велико и параллельный резистор оказывает более заметное влияние; в этом случае при измерении следует пользоваться параллельной схемой. При малых значениях индуктивности мало и ее реактивное сопротивление, так что большее влияние оказывает последовательный резистор; поэтому при измерении следует выбирать последовательную схему. Значение индуктивности, определяющее выбор того или иного режима, зависит от ее реактивного сопротивления, т. е. от частоты.

При высокой добротности индуктивности в последовательной и параллельной схемах замещения практически не отличаются между собой. Однако неоднозначность получаемых результатов существенно проявляется, когда измеряемые комплексные сопротивления имеют значительную активную составляющую. Так, при  $Q = 10$  для параллельной схемы замещения значение индуктивности возрастает на 1 % по сравнению с результатом, полученным для последовательной схемы замещения, а при  $Q = 1$  различие достигает 100 %.

Реальные катушки индуктивности однозначно трудно представить какой-либо одной схемой замещения, поскольку сопротивление потерь содержит как параллельную, так и последовательную составляющие. Кроме того, в реальных катушках имеется собственная емкость, а свойства материала сердечника зависят от частоты.

Обычно в катушках индуктивности без ферромагнитного сердечника преобладают потери в обмотке, и эквивалентное активное сопротивление можно представить включенным последовательно с индуктивностью, а у катушек с ферромагнитным сердечником основная составляющая потерь приходится на потери в сердечнике; тогда более реальна параллельная эквивалентная схема.

Собственную емкость катушек следует рассматривать включенной параллельно индуктивности. Ее влияние сказывается на результате измерения в виде завышенных значений последней. Кажущаяся

индуктивность катушки возрастает по мере приближения частоты напряжения питания измерительной схемы вплоть до резонансной частоты катушки, а после того, как частота питающего напряжения превысит резонансную частоту катушки, ее реактивное сопротивление изменит свой характер на емкостный.

Во многих случаях собственная емкость обмоток трансформаторов, дросселей со стальными сердечниками начинает сказываться на сравнительно низких частотах и может вызывать значительные погрешности измерения индуктивности. Поэтому измерения индуктивности таких объектов следует проводить либо на рабочих частотах, либо на возможно более низкой частоте. Магнитная проницаемость обычно уменьшается с ростом частоты; для материалов с малым  $\mu_c$  она растет с температурой, а для материалов с высоким  $\mu_c$  может расти или уменьшаться с увеличением температуры. Из-за всех этих вариаций при измерении индуктивности следует воспроизводить настолько близко, насколько это возможно, реальные условия ее работы.

Если переменный ток, протекающий через обмотку со стальным сердечником, приводит к существенному изменению его магнитной проницаемости, то вследствие изменения индуктивности обмотки возникает искажение формы напряжения. Это в свою очередь вызывает дополнительные погрешности измерения. Так как значения всех параметров зависят от частоты, то испытание катушек, особенно высокочастотных, желательно проводить при частоте колебаний источника питания, соответствующей их рабочему режиму.

Мерами индуктивности служат катушки индуктивности и магазины индуктивности. Катушки индуктивности выполняют в виде обмоток из медной проволоки на изоляционных каркасах. Чтобы получить малое значение остаточных параметров, каркасы катушек выполняют из материалов с магнитной проницаемостью, равной единице (например, фарфор, керамика, кварцевое стекло, пластмассы). Для уменьшения поверхностного эффекта в катушках применяют многожильный провод. Для увеличения сопротивления, изоляции обмотки катушек пропитывают специальными маслами и заливают фиксирующей массой. Для уменьшения частотной зависимости от вихревых токов зажимы катушек индуктивности выполняются из материалов с большим сопротивлением, имеют малые размеры и располагаются в местах с наименьшей плотностью магнитного потока.

Основные требования, предъявляемые к катушкам индуктивности:

стабильность параметров, минимальное активное сопротивление, независимость индуктивности от значения протекающего тока, малая зависимость индуктивности от частоты тока и от температуры окружающей среды.

Выпускаемые промышленностью катушки имеют номинальное значение индуктивности от 0,01 мкГн до 1 Гн. Погрешность аттестации мер при выпуске из производства от 0,01 до 2 %.

Из остаточных параметров наиболее сильное влияние оказывает активное сопротивление, которое стараются сделать минимальным. Для характеристики неидеальности катушек индуктивности пользуются понятиями добротности и постоянной времени.

Постоянная времени  $\tau$  есть отношение индуктивности катушки  $L$  к ее активному сопротивлению  $R$ :

$$\tau = L/R. \quad (1.33)$$

Постоянная времени имеет то преимущество, что характеризует качество самой катушки независимо от частоты протекающего тока.

Катушки взаимной индуктивности по своему устройству аналогичны катушкам индуктивности и отличаются от них наличием второй обмотки. Число витков обеих обмоток, их взаимное расположение выбираются так, чтобы номинальное значение индуктивности каждой из обмоток равнялось значению их взаимной индуктивности.

Магазин индуктивности представляет собой набор измерительных катушек индуктивности, объединенных в одном корпусе и снабженных рычажным переключателем. Для плавного изменения индуктивности применяются вариометры.

Магазины применяют в цепях переменного тока при частотах от 20 Гц до 10 МГц. Параметры схем магазинов индуктивности подбирают таким образом, чтобы независимо от значения индуктивности включенной катушки активное сопротивление магазина оставалось неизменным.

Основные технические характеристики мер индуктивности и взаимной индуктивности, выпускаемых промышленностью и имеющих в обращении, приведены в таблице П.3.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами?

2. Какие существуют схемы замещения электрических двухполюсников?
3. Что такое добротность (тангенс угла потерь) для комплексных сопротивлений?
4. Основные характеристики электрических конденсаторов?
5. Полная схема замещения катушки индуктивности и ее характеристики?
6. Меры индуктивности и емкости?

## 2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ $RLC$

### 2.1. Общие сведения

Основными параметрами цепей с сосредоточенными постоянными являются активное сопротивление, емкость и индуктивность. Кроме того, существуют дополнительные и вспомогательные параметры элементов цепей. К ним относятся полное сопротивление  $Z$  какого-либо участка цепи, добротность колебательного контура  $Q$ , тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$  конденсатора и др.

В зависимости от объекта измерений, требуемой точности результата, диапазона рабочих частот, допустимого напряжения на измеряемом объекте или внешних условий применяют различные методы. Наибольшее применение при измерении параметров линейных компонентов получили метод вольт метра-амперметра, метод непосредственной оценки, метод моста, резонансный метод и метод дискретного счета [1,3–5].

Такие параметры, как  $C$ ,  $L$ ,  $R$ ,  $t$ , в первом приближении можно считать независимыми от частоты, а остальные являются функциями частоты и поэтому при их количественной оценке необходимо указывать частоту, на которой проводится измерение. Очевидно также, что последние целесообразно измерять на той частоте, на которой объект используется в реальных условиях.

В ряде случаев характер комплексного сопротивления (индуктивный или емкостный) заранее неизвестен или даже меняется при изменении частоты; поэтому может возникать необходимость, чтобы измерительное устройство позволяло определять характер комплексного сопротивления.

Следует отметить, что понятие комплексного сопротивления имеет смысл лишь при условии, что в электрической цепи действуют синусоидальные напряжения и токи. Поэтому измерения комплексных сопротивлений и их составляющих должны проводиться с соблюдением этих условий. При несинусоидальных напряжениях и токе результат измерения может быть получен лишь для определенных гармоник путем использования специальных избирательных устройств.

Диапазоны измерения параметров комплексного сопротивления могут быть весьма широки. Так, значения измеряемых емкостей заключены в пределах от тысячных долей пикофарада до десятков тысяч микрофарад, а индуктивностей - от тысячных долей микрогенри до тысячи генри. Диапазон измеряемых добротностей  $Q$  составляет 0,01...1000,  $\operatorname{tg} \delta$  –

от 0,00001 до 10, а в отдельных частных случаях значения измеряемых  $\operatorname{tg} \delta$  и  $Q$  могут иметь значения, лежащие за пределами указанного диапазона.

Таким образом, для измерения параметров конденсаторов и катушек индуктивности необходимы методы и аппаратура, позволяющие производить раздельное измерение активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления.

Особенно широкое распространение среди измерителей параметров линейных компонентов нашли мостовые методы измерений.

Мостовые схемы обладают большой точностью, высокой чувствительностью, широким диапазоном измеряемых значений, возможностью создания как специализированных приборов, предназначенных для измерения какой-либо одной величины, так и универсальных приборов с ручным уравниванием или автоматических с цифровым отсчетом.

Резонансные методы основаны на использовании физических явлений в колебательных контурах и  $LC$ -генераторах. Эти методы могут быть разделены на контурные и генераторные.

В резонансных контурах и генераторах существуют зависимости между емкостью, индуктивностью и частотой, а также между активными параметрами контуров и соответствующими токами и напряжениями. Использование подобных зависимостей позволяет осуществить измерения различных параметров элементов контура.

Применяются резонансные методы только в области высоких частот, так как на низких частотах резонансные явления выражены менее резко, вследствие чего точность измерений получается недостаточной для практических целей. Резонансные методы позволяют измерять значения емкостей и индуктивностей такого порядка, какие имеют место в высокочастотных контурах.

При измерениях больших индуктивностей следует соблюдать ряд предосторожностей. С учетом наличия высоких реактивных сопротивлений в схемах измерения должны проводиться в пространстве, свободном от радиопомех. Измерительные проводники следует экранировать и делать как можно короче. Если катушка индуктивности содержит сердечник с высокой магнитной проницаемостью, то нужна подробная информация о характеристиках его материала. Кроме того, большие индуктивности состоят из большого числа витков тонкой проволоки, а это ведет к значительным распределенной емкости и последовательному сопротивлению. Наличие емкости приводит к



зависимости показаний от частоты. Высокое сопротивление дает уменьшение  $Q$  и увеличение разности между значениями, полученными при измерениях с последовательной или параллельной схемами включения. Высокие значения индуктивности приводят также к большим постоянным времени, а значит, и к заметным нестабильностям при изменениях сигнала или уровня постоянного подмагничивания в автоматическом режиме измерений.

Малые индуктивности имеют низкое полное сопротивление, в этом случае нужно использовать измерения методом четырехполюсника. Следует избегать, насколько это возможно, подводящих проводников и присоединять индуктивность непосредственно к измерительному прибору. Важно также соблюдать предосторожности и не размещать рядом с индуктивностью предметы, которые могут повлиять на ее значение, например приборные стойки и даже руки оператора.

Емкость можно измерять кроме мостовых методов, методом фазового или синхронного детектора, методом электронного счетчика и др.

В современных измерителях  $LCR$  применяются различные методы, главным образом цифровые, для измерения полных сопротивлений. Одним прибором обычно можно измерять импеданс,  $D$ ,  $Q$  и фазовый угол. Система может работать на нескольких частотах и при различных уровнях подмагничивания, чтобы обеспечить измерения импеданса в условиях, близких к рабочим.

Необходимость измерения сопротивления резистора, емкости конденсатора, индуктивности катушки, добротности колебательного контура при разработке, производстве, эксплуатации электронных и радиотехнических устройств достаточно велика. Подобные измерения проводятся в самых разнообразных условиях - от радиолобительской практики до производственного контроля. Это предопределяет многообразие используемых методов и средств измерений. Следует подчеркнуть, что и в данную область измерительной техники внедрены микропроцессорные системы, существенно улучшившие свойства средств измерений.

## **2.2. Метод вольтметра-амперметра**

Метод вольтметра-амперметра является одним из наиболее простых методов измерений параметров цепей с сосредоточенными постоянными. Он заключается в проведении косвенного измерения, позволяющего

определить модуль полного сопротивления при известных токе  $I$ , протекающем через исследуемый объект, и напряжении на его зажимах  $U$ .

При измерениях могут быть использованы два варианта схем (рис. 2.1). Предпочтение следует отдать схеме рис. 2.1, *a*, так как входное сопротивление современных вольтметров значительно и во многих случаях может не учитываться [3].

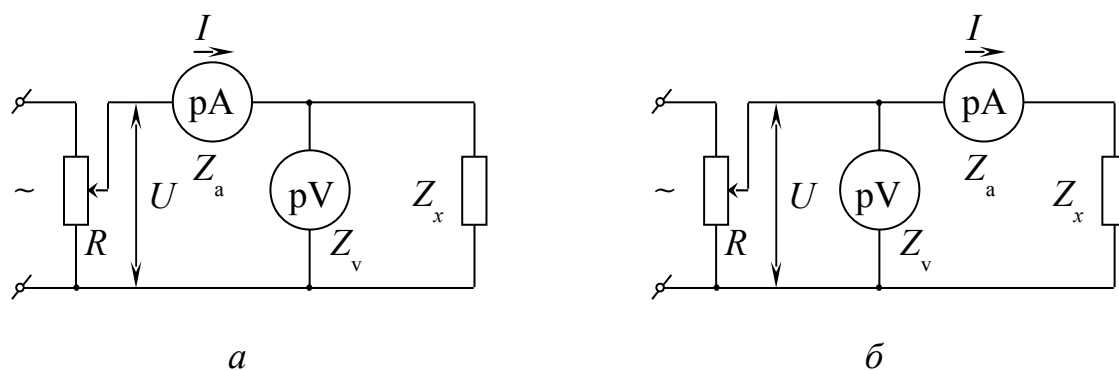


Рисунок 2.1 – Схемы измерения полного сопротивления методом вольтметра-амперметра

Измеряемые сопротивления и параметры схем связаны следующими соотношениями:

а) схема рис. 2.1, *a*

$$Z_x = \frac{U}{I - \frac{U}{Z_v}}; \quad (2.1)$$

б) схема рис. 2.1, *б*

$$Z_x = \frac{U - IZ_a}{I}, \quad (2.2)$$

где  $Z_a$ ,  $Z_v$  - входные сопротивления амперметра и вольтметра соответственно.

Если не учитывать собственных параметров амперметра и вольтметра, то это приводит к систематическим погрешностям соответственно:

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) схема рис. 2.1, а} \quad \delta Z_x = - \frac{Z_x}{Z_v} \\ \text{б) схема рис. 2.1, б} \quad \delta Z_x = - \frac{Z_a}{Z_x} \end{array} \right\} . \quad (2.3)$$

Так как сопротивления  $Z_a$ ,  $Z_v$  и  $Z_x$  в общем случае зависят от частоты, то исключение систематических погрешностей представляет довольно сложную задачу. Поэтому метод вольтметра-амперметра может быть использован только для измерений параметров элементов с характеристиками, близкими к идеальным: конденсатор с ничтожными потерями, катушки индуктивности очень высокой добротности и т. д. В таких случаях пренебрегают входными сопротивлениями амперметра и вольтметра.

Измерение емкости методом вольтметра-амперметра может быть проведено по схемам, представленным на рис. 2.2.

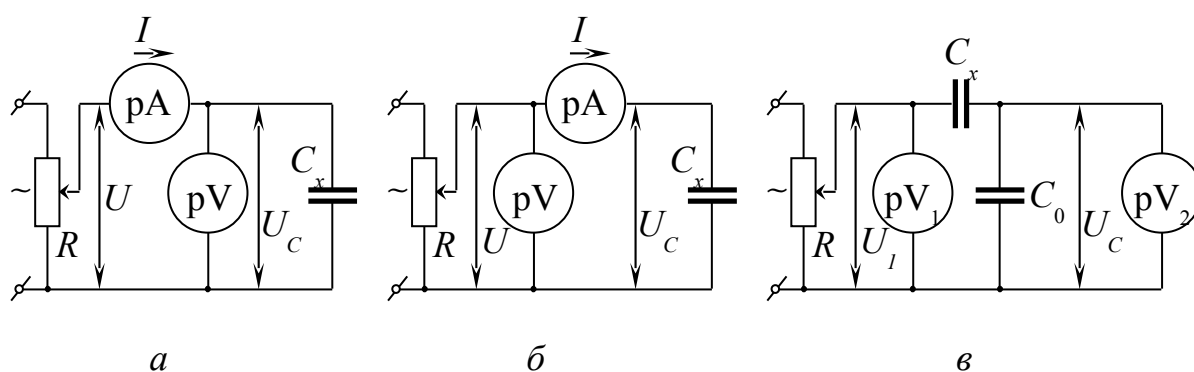


Рисунок 2.2 – Схемы измерения емкости методом вольтметра-амперметра

Емкостное сопротивление конденсатора

$$X_C = 1/\omega C_x = U_C/I, \quad (2.4)$$

откуда

$$C_x = I/\omega U_C. \quad (2.5)$$

Следовательно, при измерении емкости этим методом необходимо знать частоту источника питания. При больших емкостях, т. е. малых емкостных сопротивлениях  $X_C$ , рекомендуется схема, приведенная на рис. 2.2, а, при малых емкостях - на рис. 2.2, б. Одной из разновидностей метода вольтметра-амперметра является метод двух вольтметров,

применяемый для измерения малых емкостей по схеме, приведенной на рис. 2.2, в.

Питающее напряжение  $U_1$  измеряется вольтметром  $pV_1$ . Вольтметр  $pV_2$  показывает напряжение на  $C_0$ :

$$U_2 = IX_{C_0} = I/\omega C_0. \quad (2.6)$$

Ток  $I$  определяется выражением

$$I = U_1/(1/\omega C_1 + 1/\omega C_0), \quad (2.7)$$

откуда

$$C_x = C_0 U_2 / (U_1 - U_2). \quad (2.8)$$

Значение емкости  $C_0$  должно быть значительно, чтобы вольтметр  $pV_2$  мало влиял на режим работы схемы. При  $C_0 \gg C_x$  выражение (2.8) можно упростить и записать в виде

$$C_x = C_0 U_2 / U_1. \quad (2.9)$$

Метод двух вольтметров позволяет измерять емкости от долей пикофарад. Частотный диапазон и точность измерения определяются соответствующими характеристиками вольтметров. Погрешность измерения указанным методом составляет 5–10%.

Метод вольтметра-амперметра применяют для измерения сравнительно больших емкостей. Питание измерительной схемы обычно производят от источника тока низкой частоты:  $F = 50\text{--}1000$  Гц, поэтому оказывается возможным пренебречь активными потерями в конденсаторах, а также влиянием реактивных параметров измерительных приборов и паразитными связями.

При измерении индуктивности катушки методом вольтметра-амперметра (рис. 2.3) необходимо, чтобы ее активное сопротивление  $R_L$  было значительно меньше реактивного сопротивления  $X_L$ .

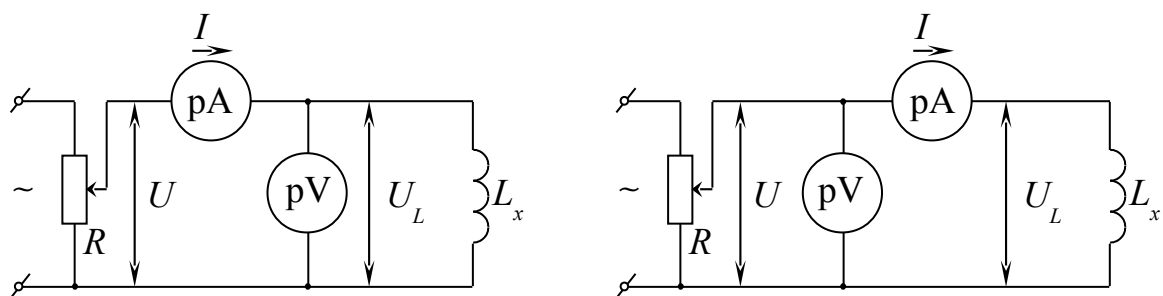


Рисунок 2.3 – Схемы измерения индуктивности методом вольтметра-амперметра

При этом по закону Ома

$$I = U_L / \omega L_x, \quad (2.10)$$

откуда

$$L_x = U_L / \omega I. \quad (2.11)$$

Если требуется получить более точный результат, то необходимо учесть активное сопротивление катушки, так как

$$Z = U_L / I = \sqrt{R_L^2 + \omega^2 L_x^2}, \quad (2.12)$$

откуда

$$L_x = \sqrt{Z^2 - R_L^2} / \omega. \quad (2.13)$$

С увеличением частоты точность измерения уменьшается вследствие влияния собственной емкости  $C_k$  катушки индуктивности и входной емкости  $C_v$  вольтметра, которые суммируются:

$$C = C_k + C_v. \quad (2.14)$$

Емкость  $C$  и измеряемая индуктивность  $L_x$  образуют параллельный контур, сопротивление которого при приближении частоты источника питания  $F$  к частоте собственных колебаний контура  $f_0$  возрастает, что эквивалентно увеличению индуктивности  $L$ . Поэтому значение индуктивности, полученное в результате измерения, будет больше действительного значения, причем разница эта увеличивается с увеличением частоты питающего напряжения.

Катушки большой индуктивности с целью уменьшения их габаритов обычно изготавливаются со стальными сердечниками. Наличие последних

приводит к нелинейной зависимости магнитного потока от тока, протекающего через катушку. Эта зависимость становится особенно сложной для катушек, работающих с подмагничиванием, через обмотки которых протекают одновременно переменный и постоянный токи. Поэтому индуктивность катушек со стальными сердечниками зависит от значения и характера протекающего через них тока. Например, при большой постоянной составляющей тока происходит магнитное насыщение сердечника и индуктивность катушки резко уменьшается. Кроме того, проницаемость сердечника и индуктивность катушки зависят от частоты переменного тока. Отсюда следует, что измерение индуктивности катушек со стальными сердечниками необходимо проводить в условиях, близких к их рабочему режиму. В схеме на рис. 2.4 это обеспечивается при дополнении ее цепью постоянного тока.

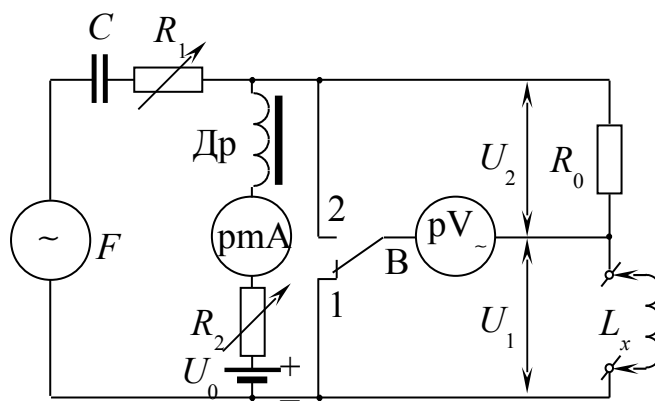


Рисунок 2.4 – Схемы измерения индуктивности катушек со стальным сердечником методом вольтметра-амперметра

В этой схеме реостатами  $R_1$  и  $R_2$  (их можно заменить потенциометрами, включенными параллельно источникам питания) устанавливают требуемый режим испытания по переменному и постоянному току. В положении 1 переключателя В вольтметр  $pV\sim$  измеряет переменное напряжение  $U_1$  на катушке  $L_x$ . При переводе переключателя в положение 2 фактически контролируется значение переменного тока в цепи по падению напряжения  $U_2$  на опорном резисторе  $R_0$ . Если потери в катушке малы, т. е.  $R \ll 2\pi FL_x$ , то измеряемую индуктивность можно рассчитать по формуле

$$L_x \approx U_1 R_0 / (2\pi F U_2). \quad (2.15)$$

Разделительный конденсатор  $C$  и дроссель  $Dr$  разделяют цепи питания постоянного и переменного тока, устраняя взаимное влияние между ними. Приборы переменного тока, применяемые в данной схеме, не должны реагировать на постоянные составляющие измеряемого ими тока или напряжения; для вольтметра  $pV$  это легко обеспечивается посредством включения последовательно с ним конденсатора емкостью в несколько микрофард.

Для измерения взаимной индуктивности между двумя катушками используется схема, приведенная на рис. 2.5.

Ток  $I$ , измеряемый амперметром, протекает по катушке  $L_1$  и наводит в катушке  $L_2$  ЭДС  $E = I\omega M$ . Эта ЭДС измеряется вольтметром с большим входным сопротивлением, поэтому показание вольтметра  $U_B$  можно считать примерно равным ЭДС взаимной индуктивности:

$$M = E/\omega I = U_B/\omega I. \quad (2.16)$$

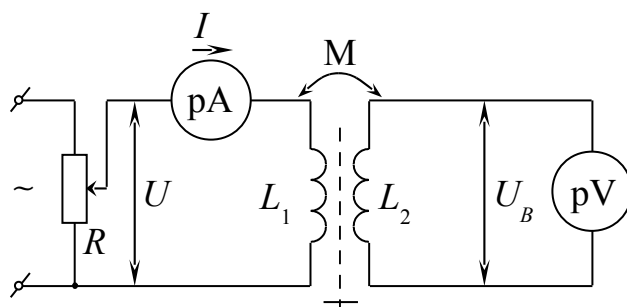


Рисунок 2.5 – Схемы измерения взаимной индуктивности методом вольтметра-амперметра

Для повышения точности измерения необходимо производить на частоте, в несколько раз меньшей собственной частоты катушки. При этом резонансные свойства катушки не проявляются, и устраняется емкостная связь между катушками.

Погрешность измерения параметров линейных компонентов электрических цепей методом вольтметра-амперметра составляет 0,5 - 10% на низких частотах и возрастает с увеличением частоты.

Преимуществом метода является то, что через измеряемый объект можно пропустить такой же ток, как и в реальных условиях его работы. Это особенно важно при измерениях параметров компонентов, значения которых зависят от тока.

К недостаткам метода можно отнести ограниченные пределы измеряемых параметров, сравнительно небольшую точность, возможность применения лишь на низких частотах.

В связи с широким использованием метода вольтметра-амперметра полезно рассмотреть более совершенную его модификацию, связанную с включением в измерительную схему операционного усилителя (рис. 2.6).

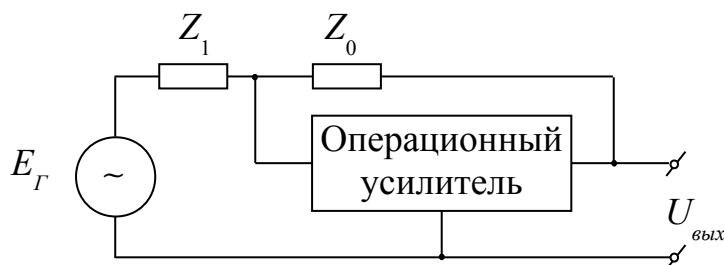


Рисунок 2.6 – Схема метода вольтметра-амперметра с использованием операционного усилителя

В этой схеме при очень большом коэффициенте усиления усилителя

$$U_{\text{вых}} = E_{\Gamma} \frac{Z_0}{Z_1} = E_{\Gamma} \frac{Y_1}{Y_0}. \quad (2.17)$$

При этом, если  $Z_0 = Z_x$ , а  $Z_x$  – чисто активное или чисто реактивное сопротивление, то  $U_{\text{вых}}$  пропорционально активной или реактивной составляющей  $Z_x$ . Если  $Z_1 = Z_x$ , а  $Z_0$  – чисто активное или чисто реактивное сопротивление, то имеется возможность измерять компоненты полной проводимости.

### 2.3. Резонансные методы

Резонансные методы широко применяются для измерения малых емкостей и индуктивностей, добротности, собственной или резонансной частоты настройки и других параметров радиодеталей и колебательных систем [4].

Резонансная схема измерения емкостей (рис. 2.7) обычно включает в себя генератор высокой частоты, с контуром которого  $L$ ,  $C$  слабо связывается индуктивно (или через емкость) измерительный контур, состоящий из опорной катушки индуктивности  $L_0$  и испытуемого конденсатора  $C_x$ .



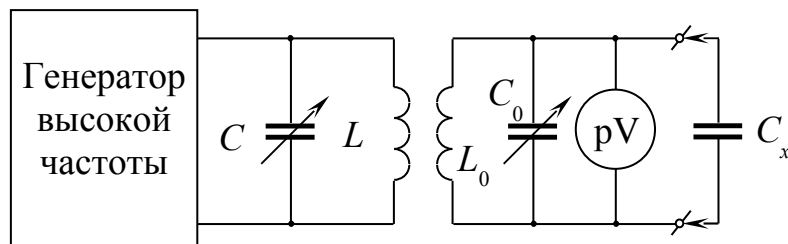


Рисунок 2.7 – Схема измерения емкостей резонансным методом

Изменением емкости конденсатора  $C$  генератор настраивают в резонанс с собственной частотой  $f_0$  измерительного контура по экстремальным показаниям индикатора резонанса, например электронного вольтметра pV. При известной частоте настройки генератора  $f_0$  измеряемая емкость определяется формулой

$$C_x = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_0} \approx 0,0253 / (f_0^2 L_0). \quad (2.18)$$

При фиксированном значении  $L_0$  конденсатор  $C$  можно снабдить шкалой с отсчетом в значениях емкостей  $C_x$ .

Пределы измерений емкостей определяются значением индуктивности  $L_0$  и диапазоном частот генератора.

Для расширения пределов измерений емкостей при ограниченном частотном диапазоне генератора применяют несколько сменных катушек  $L_0$  различной индуктивности, а также включают испытуемые конденсаторы в измерительный контур последовательно с конденсаторами известной емкости. Емкости более 0,01–0,05 мкФ резонансным методом обычно не измеряются, так как на низких частотах резонансные кривые колебательных контуров становятся тупыми, что затрудняет фиксацию резонанса.

В качестве индикаторов резонанса используют чувствительные высокочастотные приборы, реагирующие на ток или напряжение, действующие в измерительном контуре, например электронные вольтметры со стрелочным или электронно-световым индикатором, электроннолучевые осциллографы, термоэлектрические приборы и др. Индикатор резонанса не должен вносить в измерительный контур заметного затухания.

Погрешность измерения емкостей резонансным методом достигает 5 - 10% из-за воздействия паразитных связей, некоторого влияния контура генератора на параметры измерительного контура, трудности точной

фиксации состояния резонанса; она также зависит от устойчивости частоты генератора и погрешности ее измерения.

При сочетании резонансного метода с методом замещения устраняется зависимость результата измерения емкостей от точности измерения частоты генератора и паразитных связей, благодаря чему погрешность измерений можно снизить до 1% и менее. Для этого к измерительному контуру (рис. 2.7) подключают опорный конденсатор переменной емкости  $C_0$  и при максимальной емкости его  $C_{01}$  настраивают генератор на резонансную частоту контура. Затем параллельно конденсатору  $C_0$  присоединяют конденсатор  $C_x$ ; нарушенный резонанс восстанавливают при неизменной настройке генератора посредством уменьшения емкости  $C_0$  до некоторого значения  $C_{02}$ . Измеряемая емкость, очевидно, определяется формулой  $C_x = C_{01} - C_{02}$ .

Верхний предел измеряемых подобным методом емкостей равен разности между максимальной  $C_m$  и начальной  $C_n$  емкостями конденсатора  $C_0$ . Конденсаторы, емкость которых превышает значение  $C_m - C_n$ , можно подключать к контуру последовательно с постоянным конденсатором известной емкости  $C_1$ . При этом порядок измерений остается прежним, но измеряемая емкость подсчитывается по формуле

$$C_x = C_1(C_{01} - C_{02}) / (C_1 - C_{01} + C_{02}). \quad (2.19)$$

Резонансные методы позволяют измерять параметры высокочастотных катушек индуктивности в диапазоне их рабочих частот. Схемы и способы измерений аналогичны применяемым при резонансных измерениях емкостей конденсаторов с учетом, конечно, специфики объектов измерений.

Исследуемая катушка индуктивности может включаться в высокочастотный генератор как элемент его колебательного контура; в этом случае индуктивность  $L_x$  определяется на основе показаний частотомера, измеряющего частоту колебаний генератора.

В широкодиапазонных резонансных измерителях измерительный контур составляется из опорного конденсатора  $C_0$  и исследуемой катушки  $L_x$ . Контур связывают индуктивно, а чаще через конденсатор  $C_1$  небольшой емкости (рис. 2.8) с высокочастотным генератором. Если известна частота колебаний генератора  $f_0$ , соответствующая резонансной настройке контура, то измеряемая индуктивность определяется формулой

$$L_x = 1/[(2\pi f_0)^2 C_0]. \quad (2.20)$$

Возможны два варианта построения измерительных схем. В схемах первого варианта конденсатор  $C_0$  берется постоянной емкости, а резонанс достигается изменением настройки генератора, работающего в плавном диапазоне частот. Каждому значению  $L_x$  отвечает определенная резонансная частота

$$f_0 = 1/(2\pi \sqrt{L_x C_0}), \quad (2.21)$$

поэтому контурный конденсатор генератора можно снабдить шкалой с отсчетом в значениях  $L_x$ . При широком диапазоне измеряемых индуктивностей генератор должен иметь несколько частотных поддиапазонов с отдельными шкалами для оценки  $L_x$  на каждом поддиапазоне. Если в приборе используется генератор, имеющий шкалу частот, то для определения  $L_x$  по значениям  $f_0$  и  $C_0$  можно составить таблицы или графики.

Для исключения влияния собственной емкости  $C_L$  катушки на результаты измерений емкость  $C_0$  должна быть большой; с другой стороны, емкость  $C_0$  желательно иметь малой, чтобы обеспечить при измерении малых индуктивностей достаточно большое отношение  $L_x/C_0$ , необходимое для получения заметных показаний индикатора при резонансе. Практически берут  $C_0 = 500\text{--}1000$  пФ.

Если высокочастотный генератор работает в ограниченном диапазоне частот, не разбитом на поддиапазоны, то для расширения пределов измерения индуктивностей применяют несколько переключаемых конденсаторов  $C_0$ ; если их емкости различаются в 10 раз, то на всех пределах оценка  $L_x$  может производиться по одной и той же шкале генератора с использованием множителей к ней, кратных 10. Однако такая схема имеет существенные недостатки. Измерение относительно больших индуктивностей, имеющих значительную собственную емкость  $C_L$ , происходит на пределе с малой емкостью  $C_0$ , и, наоборот, измерение малых индуктивностей производится на пределе с большой емкостью  $C_0$  при невыгодном отношении  $L_x/C_0$  и малом резонансном напряжении на контуре.

В резонансных измерителях, схемы которых выполнены по второму варианту (рис. 2.8) у индуктивности измеряются при фиксированной частоте генератора  $f_0$ . Измерительный контур настраивают в резонанс с частотой генератора с помощью конденсатора переменной емкости  $C_0$ ,

отсчет по шкале которого в соответствии с формулой (2.20) может производиться непосредственно в значениях  $L_x$ . Если обозначить через  $C_m$  и  $C_n$  соответственно максимальную и начальную емкости контура, а через  $L_m$  и  $L_n$  – максимальное и наименьшее значения измеряемых индуктивностей, то пределы измерения прибора будут ограничиваться отношением  $L_m/L_n = C_m/C_n$ .

Типовые конденсаторы переменной емкости имеют перекрытие по емкости, равное примерно 30. С целью уменьшения погрешности при измерении больших индуктивностей начальную емкость  $C_n$  контура увеличивают посредством включения в контур дополнительного конденсатора  $C_d$ , обычно подстроечного типа.

Если обозначить через  $\Delta C_0$  наибольшее изменение емкости конденсатора  $C_0$ , равное разности его емкостей при двух крайних положениях ротора, то для получения выбранного отношения  $L_m/L_n$  контур должен иметь начальную емкость

$$C_n = \Delta C_0 / (L_m/L_n - 1). \quad (2.22)$$

Для расширения общего диапазона измерений предусматривают работу генератора на нескольких переключаемых фиксированных частотах. Если соседние частоты генератора различаются в  $\sqrt{10} \approx 3,16$  раза, то на всех пределах можно использовать общую шкалу индуктивностей конденсатора  $C_0$  с множителями к ней, кратными 10 и определяемыми установкой переключателя частот (рис. 2.8). Плавное перекрытие всего диапазона измеряемых индуктивностей обеспечивается при отношении емкостей контура  $C_m/C_n \geq 10$ . Если конденсатор  $C_0$  логарифмического типа, то шкала индуктивностей близка к линейной.

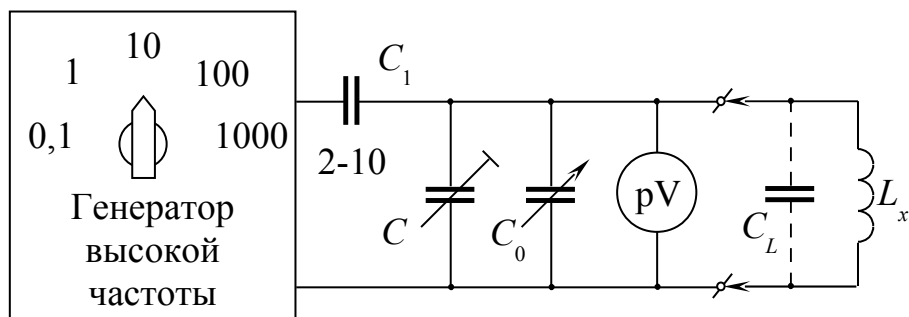


Рисунок 2.8 – Резонансная схема измерения индуктивности с отсчетом по шкале опорного конденсатора

Вместо генератора фиксированных частот можно применить измерительный генератор с плавным изменением частоты, которую устанавливают в зависимости от требуемого предела измерения индуктивностей.

Резонансные схемы измерения индуктивностей и емкостей часто совмещаются в одном приборе, поскольку они имеют ряд идентичных элементов и сходную методику измерений.

Приборы, предназначенные для измерения добротности элементов высокочастотных цепей, часто называют куметрами. Действие куметров основано на использовании резонансных явлений, что позволяет измерение добротности сочетать с измерением индуктивности, емкости, собственной резонансной частоты и ряда других параметров испытываемых элементов.

Куметр, упрощенная схема которого приведена на рис. 2.9, содержит три основных компонента: генератор высокой частоты, измерительный контур и индикатор резонанса. Генератор работает в широком, плавно перекрываемом диапазоне частот, например от 50 кГц до 50 МГц; это позволяет многие измерения проводить на рабочей частоте испытываемых элементов.

Исследуемая катушка индуктивности  $L_x$ ,  $R_x$  через зажимы 1 и 2 включается в измерительный контур последовательно с опорным конденсатором переменной емкости  $C_0$  и конденсатором связи  $C_2$ , емкость последнего должна удовлетворять условию:  $C_2 \gg C_{0.m}$ , где  $C_{0.m}$  – максимальная емкость конденсатора  $C_0$ . Через емкостный делитель  $C_1$ ,  $C_2$  с большим коэффициентом деления  $N = (C_2 + C_1)/C_1$  в контур вводится от генератора опорное напряжение  $U_0$  требуемой высокой частоты  $f$ . Возникающий в контуре ток создает падение напряжения  $U_C$  на конденсаторе  $C_0$ , которое измеряется высокочастотным вольтметром  $pV_2$ .

Входное сопротивление вольтметра  $pV_2$  в пределах рабочих частот куметра должно быть очень велико. При достаточно высокой чувствительности вольтметр подключают к измерительному контуру через емкостный делитель напряжения, входную емкость которого учитывают как компонент начальной емкости конденсатора  $C_0$ . Поскольку все конденсаторы, входящие в состав измерительного контура, имеют весьма малые потери, то можно считать, что активное сопротивление контура в основном определяется сопротивлением потерь  $R_x$  исследуемой катушки.

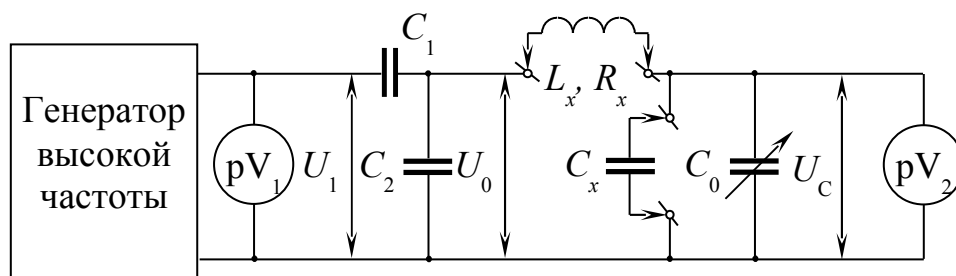


Рисунок 2.9 – Упрощенная схема куметра

Изменением емкости конденсатора  $C_0$  измерительный контур настраивают в резонанс с частотой генератора  $f$  по максимальным показаниям вольтметра  $pV_2$ . При этом в контуре будет протекать ток  $I_p \approx U_0/R_x$ , создающий на конденсаторе падение напряжения

$$U_C = I_p/(2\pi f C_0) \approx U_0/(2\pi f C_0 R_x). \quad (2.23)$$

Учитывая, что при резонансе  $1/(2\pi f C_0) = 2\pi f L_x$ , находим

$$U_C \approx U_0(2\pi f L_x)/R_x = U_0 Q_L,$$

где  $Q_L = (2\pi f L_x)/R_x$  есть добротность катушки  $L_x$  при частоте  $f$ . Следовательно, показания вольтметра  $pV_2$  пропорциональны добротности  $Q_L$ . При фиксированном напряжении  $U_0$  шкалу вольтметра можно линейно градуировать в значениях  $Q_L \approx U_C/U_0$ .

Номинальное напряжение  $U_0$  устанавливают регулировкой режима выходного каскада генератора. Контроль этого напряжения осуществляют по показаниям высокочастотного вольтметра  $pV_1$ , измеряющего напряжение  $U_1 = U_0 N$  на выходе генератора.

Составляющие погрешности измерения добротности и их причины. Так как измеренное значение добротности определяется отношением  $U_C/U_0$ , то погрешность измерения добротности, в основном, складывается из погрешностей измерения напряжений  $\delta U_0$  и  $\delta U_C$ .

$$\delta Q = \sqrt{(\delta U_0)^2 + (\delta U_C)^2}. \quad (2.25)$$

В этом выражении не учтены погрешности из-за нестабильности частоты генератора измерителя, потерь в образцовом конденсаторе и шунтирующего действия вольтметра, измеряющего  $U_C$ . Погрешности,

вызванные первыми двумя причинами, могут быть сделаны существенно меньшими по сравнению с  $\delta Q$  путем применения генераторов высокой стабильности по частоте и повышения качества конденсаторов. Шунтирующее же действие вольтметра необходимо учитывать особенно при больших значениях  $Q$ . С этой целью измерители добротности градуируют с помощью образцовых катушек, аттестованных по добротности.

В цифровых измерителях добротности, принцип действия которых основан на счете числа периодов затухающих колебаний в исследуемом контуре, погрешность измерения в основном обусловлена нестабильностью параметров элементов его схемы, дискретностью счета и неточностью срабатывания сравнивающего устройства.

В куметрах промышленного изготовления погрешность измерения добротности составляет 3 - 5%. Она увеличивается при испытании катушек с высокой добротностью и большой собственной емкостью. Погрешность возрастает и с повышением частоты вследствие уменьшения входного сопротивления вольтметров и усиления влияния паразитных наводок на измерительный контур. Для уменьшения этих наводок генератор тщательно экранируют, весь прибор в целом также помещают в экран; испытываемые элементы присоединяют к прибору жесткими проводниками, а их экраны надежно соединяют с металлическим кожухом прибора. Неэкранированные катушки при испытании по возможности удаляют от кожуха прибора.

Для проверки работы куметра и расширения его возможностей используют опорные катушки  $L_0$  с известными индуктивностью и добротностью. Обычно имеется комплект из нескольких сменных катушек  $L_0$ , которые вместе с конденсатором переменной емкости  $C_0$  обеспечивают резонансную настройку измерительного контура в пределах всего диапазона рабочих частот генератора.

Куметрами измеряют и добротность колебательного контура  $Q$ . Один из способов реализуется в схеме куметра (рис. 2.9). При этом катушку индуктивности контура подключают к зажимам  $L_x$ , а конденсатор - к зажимам  $C_x$ . Устанавливают минимальное значение емкости образцового конденсатора. Частоту генератора перестраивают до наступления резонанса напряжений в контуре (последовательный контур). Так как при резонансе напряжение на реактивной ветви в  $Q$  раз больше известного напряжения  $U_0$ , возбуждающего контур, то напряжение на конденсаторе при неизменном  $U_0$  получается пропорциональным

добротности контура (если добротность достаточно высока, по крайней мере  $Q > 10$ ):

$$U_c = QU_0. \quad (2.26)$$

Шкала электронного вольтметра градуируется в единицах  $Q$ .

Влияние емкости образцового конденсатора на добротность контура исключают следующим образом. Сначала образуют контур из элементов  $L_k, C_0$ , подключая к зажимам  $L_x$  только катушку индуктивности. Измеряют значение добротности  $Q_1 = 2\pi f_1 L_k / R$  при резонансной частоте  $f_1 = 1/2\pi \sqrt{L_k C_0}$ . Затем параллельно образцовому конденсатору подключают конденсатор контура. Измеряют значение добротности  $Q_2 = 2\pi f_2 L_k / R$  при новой резонансной частоте:

$$f_2 = 1/2\pi \sqrt{L_k (C_k + C_0)}.$$

Значение собственно добротности  $Q_0 = 2\pi f_0 L_k / R$ , где  $f_0 = 1/2\pi \sqrt{L_k C_k}$  определяется из формулы

$$Q_0 = Q_1 Q_2 / \sqrt{Q_1^2 - Q_2^2}. \quad (2.27)$$

Формула (2.27) справедлива, если частоты  $f_1$  и  $f_2$  различаются не сильно, так что активное сопротивление контура  $R$  в этом частотном интервале можно считать неизменным.

Добротность контура можно измерить также косвенным методом переменной частоты. При этом непосредственно измеряют полосу пропускания контура  $\Delta F$  на относительном уровне  $1/\sqrt{2}$  и резонансную частоту  $f_0$ , а добротность вычисляют по известной формуле

$$Q = f_0 / \Delta F. \quad (2.28)$$

Методика измерений такова. Изменением частоты генератора, с которым слабо связан исследуемый контур, добиваются резонанса в контуре и фиксируют значения резонансной частоты  $f_0$  и амплитуды напряжения  $U_p$  на контуре. Затем, устанавливая частоты  $f_1$  и  $f_2$  выше и ниже резонансной, которым соответствуют одинаковые показания вольтметра  $pV$ , определяют полосу пропускания контура  $\Delta F = f_2 - f_1$ .



Для уменьшения погрешностей измерений необходимо применять вольтметр с большим входным активным сопротивлением и малой входной емкостью, а также следить за тем, чтобы в процессе измерений амплитуда напряжения, возбуждающего контур, оставалась неизменной.

Определить добротность контура можно и по ширине полосы  $\Delta F_A$ , измеренной на произвольном уровне  $A = U/U_p$  резонансной кривой, если отношение  $A$  не слишком мало, пользуясь расчетной формулой:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta F_A} \sqrt{\frac{1 - A^2}{A^2}} = \frac{1}{2} \frac{f_1 + f_2}{f_1 - f_2} \sqrt{\frac{1 - A^2}{A^2}}. \quad (2.29)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – частоты, соответствующие одному и тому же уровню резонансной кривой по обе стороны от резонансной частоты.

Самая высокая точность измерений получается, когда  $A = 0,707$ .

Наибольший удельный вес в общей погрешности измерений добротности контура описанным методом имеет погрешность определения полосы  $\Delta F = f_1 - f_2$ . Поэтому частоты  $f_1$  и  $f_2$  нужно измерять с высокой точностью (например, электронно-счетным частотомером).

С помощью куметра способом вариации параметров контура можно определить собственную емкость катушки индуктивности  $C_L$ .

При двух произвольных значениях емкостей  $C_{01}$  и  $C_{02}$  конденсатора  $C_0$  изменением настройки генератора находят резонансные частоты контура  $f_1$  и  $f_2$ . Искомая емкость

$$C_L = (C_{02}f_2^2 - C_{01}f_1^2) / (f_1^2 - f_2^2). \quad (2.30)$$

Одновременно можно определить и тангенс угла потерь (добротность) конденсатора:

$$\operatorname{tg} \delta = 1 / (2\pi f C_x R_n), \quad (2.31)$$

(где  $R_n$  – сопротивление потерь). Для этого при двух значениях емкостей  $C_{01}$  и  $C_{02}$ , соответствующих резонансным настройкам контура без конденсатора  $C_x$  и при подключении последнего, находят добротности контура  $Q_1$  и  $Q_2$ , а затем совершают вычисление по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 - Q_2} \frac{C_{01} - C_{02}}{C_{01}}. \quad (2.32)$$

В основу генераторного метода положена зависимость частоты генератора с самовозбуждением от реактивных элементов резонансного контура.

Для повышения разрешающей способности и точности измерений применяются два генератора, а момент резонанса фиксируется по нулевым биениям.

Схема измерителя индуктивностей и емкостей с использованием генераторов с самовозбуждением приведена на рис. 2.10.

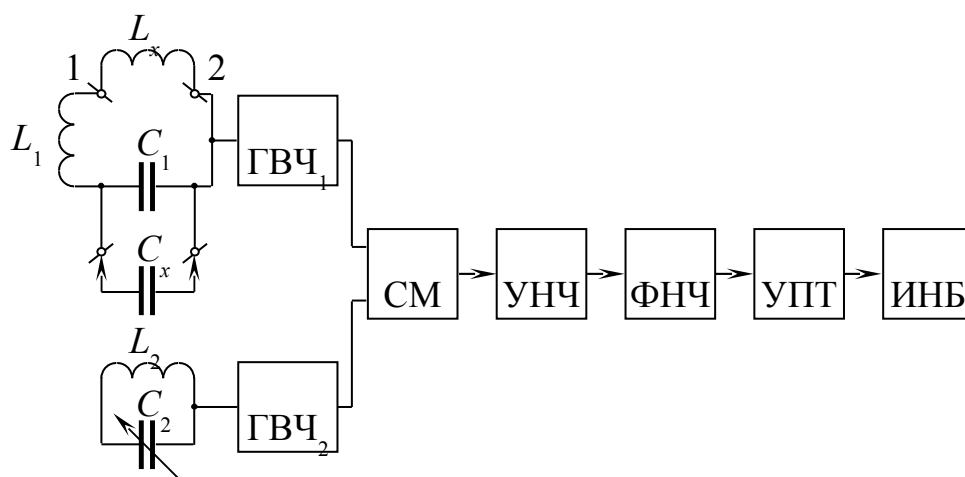


Рис. 2.10 – Схема измерения индуктивности и емкости методом двух генераторов

В схеме имеются два высокочастотных генератора ГВЧ<sub>1</sub> и ГВЧ<sub>2</sub>, собранных по одинаковой схеме. В зависимости от рода работы измерителя (измерение индуктивности или емкости) в колебательный контур генератора ГВЧ<sub>1</sub> образованный индуктивностью  $L_1$  и емкостью  $C_1$ , включается последовательно измеряемая индуктивность  $L_x$  или параллельно измеряемая емкость  $C_x$ .

Колебания высокой частоты обоих генераторов подаются на смеситель СМ. Колебания разностной частоты с выхода смесителя усиливаются усилителем низкой частоты УНЧ и подаются на фильтр нижних частот ФНЧ.

Сигнал с ФНЧ усиливается усилителем постоянного тока УПТ и подается на индикатор нулевых биений ИНБ.

Сначала измерительные зажимы 1 и 2 колебательного контура генератора ГВЧ<sub>1</sub> закорачиваются и изменением емкости конденсатора  $C_2$  частоту генератора ГВЧ<sub>2</sub> настраивают на частоту первого генератора.

При этом выполняется равенство

$$C_1 L_1 = C_2' L_2. \quad (2.33)$$

При измерении индуктивности  $L_x$  последняя подключается в контур генератора ГВЧ<sub>1</sub> последовательно с  $L_1$  к зажимам 1, 2, и вновь, изменяя емкость конденсатора  $C_2$ , добиваются равенства частот обоих генераторов.

В этом случае выполняется равенство

$$C_1 (L_x + L_1) = C_2'' L_2. \quad (2.34)$$

Отсюда с учетом (2.33)

$$L_x = L_2 (C_2'' - C_2') / C_1. \quad (2.35)$$

При измерении емкости конденсатор  $C_x$  подключается параллельно  $C_1$ .

Выполнив те же операции настройки, получим искомую величину:

$$C_x = L_2 (C_2'' - C_2') / L_1. \quad (2.36)$$

К преимуществам метода двух генераторов можно отнести достаточную простоту схемотехнических решений и как следствие этого низкую стоимость измерителей.

Индикация равенства частот генераторов по биениям обеспечивает высокую разрешающую способность метода, что позволяет использовать его для измерения малых изменений параметров компонентов. Погрешность измерения указанным методом составляет 0,5 - 10%.

Основным недостатком метода является зависимость частоты измерения от номинала измеряемого объекта, т. е. невозможность измерения на какой-либо заранее выбранной фиксированной частоте, а также невозможность измерения потерь в конденсаторах или катушках индуктивности и слабая защищенность от паразитных параметров, присущая всем двухзажимным измерителям.

Метод используется в измерителях индуктивностей и емкостей высокочастотных Е12-1А, Е7-5А, Е7-9.

## 2.4. Мостовые методы

Для измерения емкости, индуктивности, взаимной индуктивности и тангенса угла потерь линейных компонентов электрических цепей используются мосты переменного тока [4].

Схемы мостов переменного тока отличаются большим разнообразием.

Кроме простых четырехплечих мостовых схем, применяют более сложные шести и семиплечие мостовые схемы, а также схемы мостов с индуктивно-связанными элементами. Эти схемы путем последовательных эквивалентных преобразований могут быть приведены к простой четырехплечей схеме, которая является основной.

Схема четырехплечего моста переменного тока приведена на рис. 2.11.

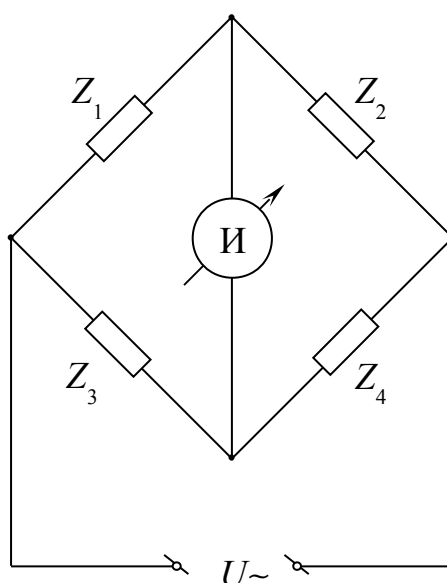


Рисунок 2.11 – Схема одинарного четырехплечного моста переменного тока

Условие равновесия четырехплечного одинарного моста записывается в комплексной форме как равенство произведений сопротивлений противолежащих плеч:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3. \quad (2.37)$$

Сопротивления плеч  $Z_i$  в общем случае представляют собой комплексные сопротивления вида  $Z_i = R_i + jX_i$ .

Подставив значения  $Z_i$  в условие равновесия моста (2.37) и разделив вещественные и мнимые части, получим условие равновесия в виде двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_1 R_3 - X_1 X_3 &= R_2 R_4 - X_2 X_4 \\ X_1 R_3 + X_3 R_1 &= X_2 R_4 + X_4 R_2 \end{aligned} \right\}. \quad (2.38)$$

Наличие двух уравнений, определяющих условие равновесия моста переменного тока, требует введения в схему моста не менее двух регулируемых элементов. Два независимых уравнения равновесия (2.38) дают возможность определить мостом переменного тока одновременно две независимые величины.

Записав выражение (2.37) в показательной форме, получим

$$Z_1 e^{j\varphi_1} Z_4 e^{j\varphi_4} = Z_2 e^{j\varphi_2} Z_3 e^{j\varphi_3}. \quad (2.39)$$

Соотношение (2.39) также распадается на два скалярных равенства:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 Z_4 &= Z_2 Z_3 \\ \varphi_1 + \varphi_4 &= \varphi_2 + \varphi_3 \end{aligned} \right\}. \quad (2.40)$$

Отсюда следует, что равновесие наступает при равенстве произведений модулей комплексных сопротивлений противолежащих плеч и равенстве сумм их фазовых сдвигов. Второе уравнение (2.40) показывает, каким по характеру должны быть сопротивления плеч мостовой схемы, чтобы обеспечить равновесие. Если в двух смежных плечах включены активные сопротивления (например,  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = 0$ ), то в двух других смежных плечах должны быть обязательно сопротивления одного характера, т. е. или индуктивности, или емкости. Если активные сопротивления включены в противоположные плечи (например,  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_4 = 0$ ), то в два других противоположных плеча необходимо включить разные по характеру сопротивления: в одно плечо - индуктивность, в другое – емкость.

На точность измерения мостами переменного тока существенное влияние оказывает его чувствительность.

Относительной чувствительностью мостовой схемы переменного тока по напряжению называется комплексная величина, равная отношению выходного напряжения к относительному изменению переменного сопротивления:

$$S_U = U_{\text{вых}} / (\Delta Z_1 / Z_1), \quad (2.41)$$

где выходное напряжение для схемы на рис. 2.11 можно определить по формуле

$$U_{\text{вых}} = U(Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3) / (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4). \quad (2.42)$$

Если при равновесии моста ( $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ ) одно из плеч, например  $Z_1$ , получит приращение  $\Delta Z_1$ , то выходное напряжение можно представить выражением

$$U_{\text{вых}} \approx U \Delta Z_1 Z_4 / (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4). \quad (2.43)$$

Разделив числитель и знаменатель выражения (2.43) на  $Z_1 Z_4$  и подставив значение  $U_{\text{вых}}$  в (2.41) получим:

$$S_U = U \frac{1}{(1 + Z_2/Z_1)(1 + Z_3/Z_4)}. \quad (2.44)$$

Обозначим  $k = Z_2/Z_1 = Z_4/Z_3$ , тогда

$$S_U = U \frac{1}{(1 + k)(1 + 1/k)} = U \frac{k}{(1 + k)^2} = UA. \quad (2.45)$$

Определим, в каком случае чувствительность моста переменного тока будет наибольшей.

Из (2.45) видно, что чувствительность  $S_U$  при заданном значении напряжения  $U$  может быть повышена только за счет увеличения модуля комплексного числа  $A$ .

Представив комплексное число  $k$  в виде  $m + jn$ , получим:

$$A = k / [(1 + m)^2 + n^2] = k / (1 + 2m + m^2 + n^2).$$

С учетом того, что  $m = k \cos \varphi_k$  и  $n = k \sin \varphi_k$ , находим

$$A = k / (1 + 2k \cos \varphi_k + k^2). \quad (2.46)$$

При  $k = 1$  и  $\varphi_k = \pi$  правая часть выражения (2.46) обращается в бесконечность, и, следовательно, чувствительность моста переменного тока теоретически равна бесконечности. Эти условия означают, что сопротивления плеч должны быть попарно равны ( $Z_1 = Z_2$  и  $Z_3 = Z_4$ ), а фазовый угол плеч, расположенных по обе стороны индикатора, должен быть равен  $\pm \pi$ , т. е. в плечах моста должны попеременно чередоваться емкость и индуктивность.

В неуравновешенных мостах переменного тока амплитуда и фаза выходного напряжения на зажимах индикаторной диагонали зависят как от модуля, так и от состава объекта измерений  $Z_x$ . При сравнительно малом отклонении от состояния равновесия активная и реактивная составляющие выходного напряжения оказываются примерно пропорциональными приращениям аналогичных составляющих комплексного сопротивления  $Z_x$  относительно тех значений, при которых мост уравновешен. Посредством двух фазочувствительных систем удастся разделить составляющие выходного напряжения, сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ , которые затем раздельно измеряются двумя индикаторами; отчет по шкалам последних производится соответственно в значениях активной и реактивной составляющих сопротивления  $Z_x$ .

Мосты для измерения емкости и угла потерь конденсаторов. Как отмечалось в п. 1.2, реальный конденсатор можно представить последовательной или параллельной схемой замещения. Последовательная схема в большей степени отвечает случаю, если потери в диэлектрике незначительные; при больших потерях в диэлектрике применяют параллельную схему замещения [6].

В связи с этим для измерения емкости и угла потерь конденсаторов с малыми потерями используют мостовую схему, изображенную на рис. 2.12,а, а с большими - на рис. 2.12,б. На схеме рис. 2.12,а, измеряемый конденсатор представлен в виде последовательного соединения емкости  $C_x$  и сопротивления потерь  $R_x$ .

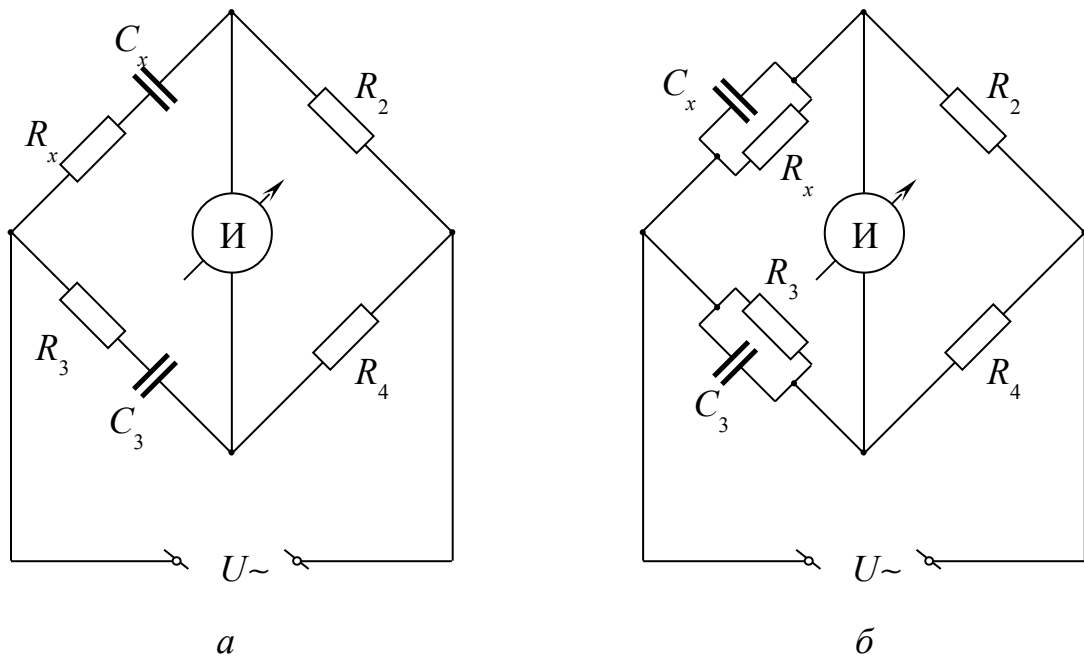


Рисунок 2.12 – Схемы мостов для измерения емкости и угла потерь конденсаторов

Условие равновесия для схемы на рис. 2.12,а имеет вид:

$$(R_x - j/\omega C_x)R_4 = (R_3 - j/\omega C_3)R_2.$$

Разделив в полученном уравнении вещественную и мнимую части, получим:

$$R_x = R_3 R_2 / R_4; \quad C_x = C_3 R_4 / R_2. \quad (2.47)$$

Тангенс угла потерь для конденсаторов с последовательной схемой замещения

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega R_x C_x = \omega R_3 C_3, \quad (2.48)$$

где  $\omega$  – угловая частота напряжения питания моста.

Для схемы на рис. 2.12,б с параллельным соединением  $C_x$  и  $R_x$  условие равновесия запишется в виде

$$\left( \frac{1}{R_x = 1/j\omega C_x} \right) R_4 = \left( \frac{1}{R_3 = 1/j\omega C_3} \right) R_2,$$

откуда

$$R_x = R_3 R_4 / R_2; \quad C_x = C_3 R_2 / R_4. \quad (2.49)$$



Тангенс угла потерь при параллельной схеме замещения определяется выражением

$$\operatorname{tg} \delta_x = 1/\omega C_x R_x = \omega R_3. \quad (2.50)$$

Уравновешивание этих схем производят поочередным изменением сопротивления  $R_3$  и емкости  $C_3$ . Для расширения пределов измерения изменяют отношение  $R_2/R_4$  (или  $R_4/R_2$ ).

Мосты для измерения индуктивности и взаимной индуктивности катушек. В мостовых схемах для измерения индуктивности в качестве плеча сравнения может использоваться образцовая катушка индуктивности (рис. 2.13,а) или образцовый конденсатор (рис. 2.13,б). В схеме на рис. 2.13,а, кроме образцовой катушки с индуктивностью  $L_{\text{обр}}$ , используется дополнительный переменный резистор  $R_{\text{обр}}$ , регулировкой которого достигается баланс фаз.

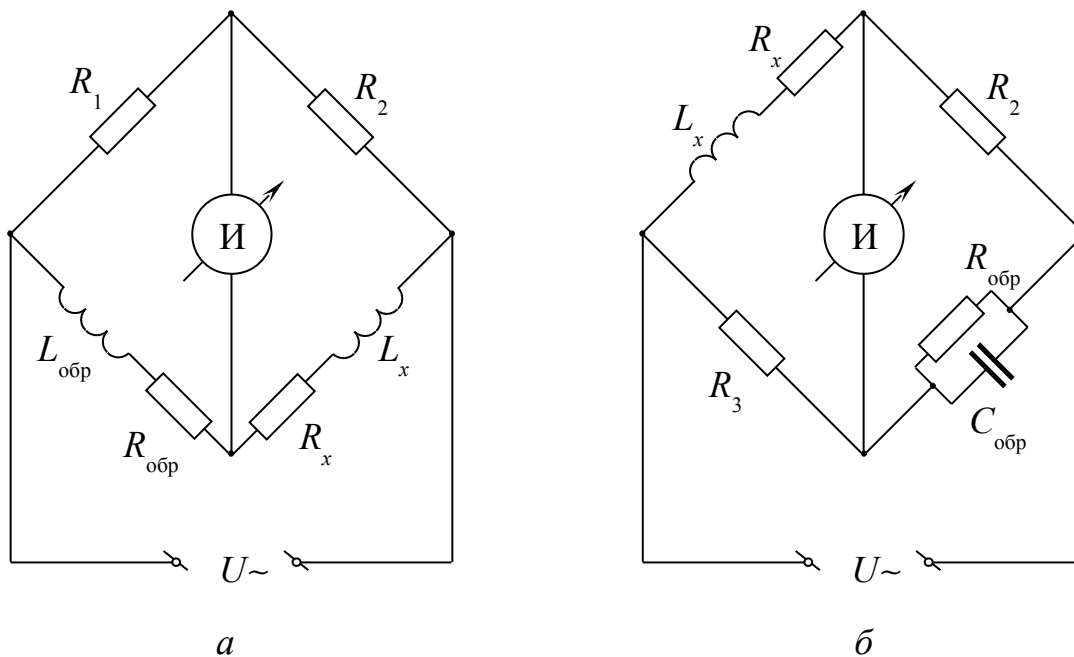


Рисунок 2.13 – Схемы мостов для измерения индуктивности

Уравнение равновесия для схемы на рис. 2.13,а имеет вид:

$$R_1(R_x + j\omega L_x) = R_2(R_{\text{обр}} + j\omega L_{\text{обр}}). \quad (2.51)$$

Приравнивая отдельно действительные и мнимые части уравнения (2.51), находим:

$$L_x = R_2 L_{\text{обр}} / R_1; \quad R_x = R_2 R_{\text{обр}} / R_1. \quad (2.52)$$

В связи с трудностями изготовления образцовых катушек с малыми потерями в мостах переменного тока для измерения индуктивностей в качестве образцовой меры чаще применяется не катушка индуктивности, а конденсатор (рис. 2.13,б).

Для этой схемы

$$(R_x + j\omega L_x)/(1/R_{обр} + j\omega C_{обр}) = R_2 R_3, \quad (2.53)$$

или

$$R_x + j\omega L_x = (1/R_{обр} + j\omega C_{обр})R_2 R_3. \quad (2.54)$$

Разделив в (2.54) вещественную и мнимую части, получим следующие выражения для измеряемых параметров катушки индуктивности:

$$L_x = C_{обр} R_2 R_3; \quad R_x = R_2 R_3 / R_{обр}. \quad (2.55)$$

Добротность катушки определяется выражением

$$Q_x = \omega L_x / R_x = \omega R_{обр} C_{обр}. \quad (2.56)$$

Уравновешивание схемы достигается плавной регулировкой параметров  $R_{обр}$  и  $C_{обр}$ . Изменяя произведение  $R_2 R_3$ , можно расширять пределы измерения моста.

Параллельное соединение элементов  $R_{обр}$  и  $C_{обр}$  в мостовой схеме используют для измерения параметров катушек с низкой добротностью ( $Q < 30$ ).

Для катушек с высокой добротностью лучшую сходимость имеет схема с последовательным соединением  $R_{обр}$  и  $C_{обр}$ .

Мостовые схемы, приведенные на рис. 2.13, могут быть использованы для измерения взаимной индуктивности между двумя катушками. Для этого они соединяются последовательно и взаимная индуктивность  $M$  определяется методом двукратного измерения.

В первом случае катушки соединяются согласно (рис. 2.14,а) и измеряется их общая индуктивность:

$$L' = L_1 + L_2 + 2M, \quad (2.57)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – индуктивности катушек.



Рисунок 2.14 – Схемы соединения катушек при измерении взаимной индуктивности методом двукратного измерения

Во втором случае катушки соединяются встречно (рис. 2.14,б) и вновь измеряется общая индуктивность:

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M, \quad (2.58)$$

Вычитая (2.57) из (2.58), получаем искомую величину:

$$M = (L' - L'')/4.$$

Недостаток рассмотренной схемы - плохая сходимость моста при измерении параметров катушек с низкой добротностью. Если  $Q = 1$ , процесс уравнивания уже затруднен, а при  $Q < 0,5$  уравнивание моста практически невозможно.

Измерение параметров катушек индуктивности с низкой добротностью производится с помощью шестиплевого моста (рис. 2.15).

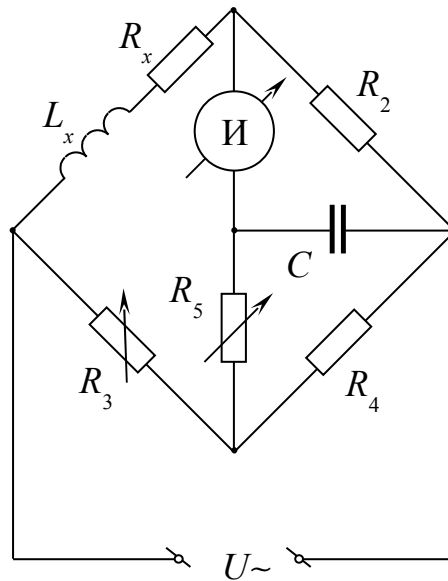


Рисунок 2.15 – Схема шестиплечного моста

Шестиплечий мост по схеме рис. 2.15 предназначен для точных измерений индуктивностей в звуковом диапазоне частот. Хорошая сходимость моста объясняется независимостью условия равновесия по активной составляющей от сопротивления  $R_5$ . Поэтому условие  $R_x R_4 = R_2 R_3$  не нарушается при дальнейшем уравнивании изменением  $R_5$ , необходимым для выполнения условия равновесия по индуктивности. В связи с этим первое уравнивание часто производят на постоянном токе.

Условия равновесия такого моста можно найти следующим образом: треугольник, образованный элементами  $R_4$ ,  $R_5$  и  $C$ , преобразуют в звезду, при этом мост преобразуется в четырехплечий, уравнение равновесия которого нам уже знакомо. После указанных преобразований находим два условия равновесия моста:

$$R_x = \frac{R_2}{R_4} R_3; \quad (2.59)$$

$$L_x = C \frac{R_2}{R_4} [R_3 R_4 + R_5 (R_3 + R_4)]; \quad (2.60)$$

$$Q_x = \frac{\omega C [R_3 R_4 + R_5 (R_3 + R_4)]}{R_3}. \quad (2.61)$$

Мост уравнивается регулировкой  $R_3$  и  $R_5$ . Первоначально регулировкой  $R_3$  выполняется первое условие равновесия моста, затем регулировкой  $R_5$  - второе условие. Значение  $R_5$  не входит в первое условие,

поэтому регулировка  $R_5$  не нарушает этого условия равновесия. Благодаря такому свойству мост обладает хорошей сходимостью.

Свойство моста, определяющее число необходимых для уравнивания поперемненных регулировочных операций, называется сходимостью.

Уравнивание мостов переменного тока производится двумя элементами, в качестве которых используются магазины сопротивлений или емкостей. Магазины сопротивлений по конструкции проще магазинов емкостей, и дешевле их, поэтому при выборе элементов, уравнивающих мост, предпочтение часто отдается им. Однако при этом в мостах могут возникнуть трудности в процессе уравнивания, которые наглядно видны на примере схемы моста для измерения индуктивности (рис. 2.16, а).

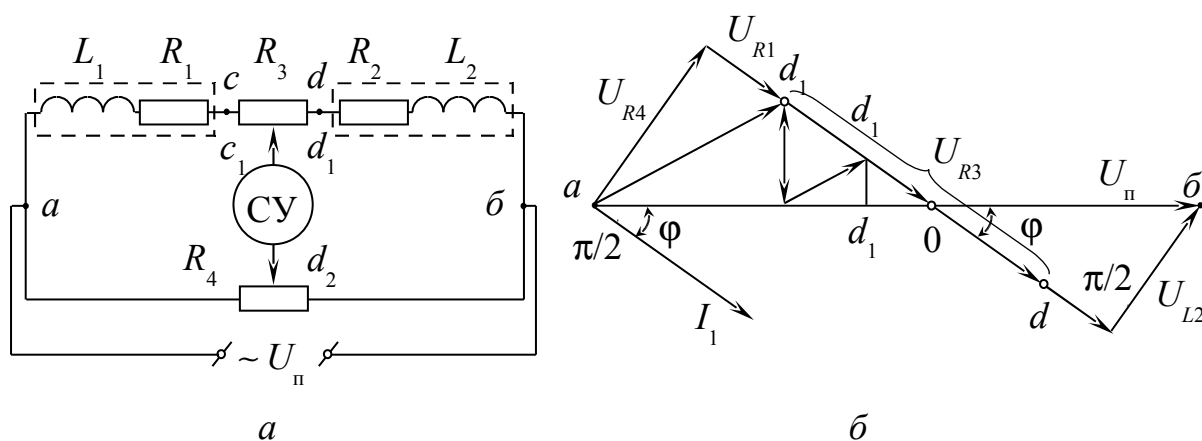


Рисунок 2.16 – Схема моста для измерения индуктивности (а) и диаграмма процесса его уравнивания (б)

Катушка индуктивности с измеряемыми параметрами  $L_1$ ,  $R_1$  включена в первое плечо моста; во второе плечо включена катушка с известными параметрами  $L_2$ ,  $R_2$ . Уравнивается мост двумя реохордами  $R_3$ ,  $R_4$ . На рис. 2.16, б представлена векторная диаграмма, иллюстрирующая процесс уравнивания. Допустим, что в исходном состоянии движки реохордов  $d_1$   $d_2$  находятся в крайнем левом положении, а сравнивающее устройство обладает большим входным сопротивлением. В таком случае на выводах СУ действует напряжение, которое на рис. 2.16, б отражается вектором  $ad_1$ . Уравнивание моста начинается с перемещения движка  $d_2$  до получения минимального напряжения на СУ; этому условию соответствует точка  $d$  на рис. 2.16, б, а напряжение на СУ соответствует вектору  $d_1d'_2$ . Затем перемещается движок  $d_1$  до получения следующего

минимума напряжения на СУ; этому условию соответствует точка  $d'_1$ . Потом перемещается движок  $d_2$  до точки  $d'_2$  и т. д., пока напряжение на СУ не станет равным нулю (точка 0 на рис. 2.16, б). Количество регулировок элементов схемы моста, необходимое для его уравнивания, характеризуют понятием «сходимость моста». Сходимость моста — характеристика качественная, она может быть хорошей или плохой; В случае хорошей сходимости моста число регулировок его элементов мало, при плохой сходимости - велико. Из рис. 2.16, б видно, что сходимость моста зависит от значения угла  $\varphi$  между напряжением питания и током верхней ветви. При малых  $\varphi$ , что соответствует низкой добротности катушек индуктивности, сходимость моста будет плохой.

Трансформаторные мостовые схемы [4–6]. В трансформаторных схемах используются свойства цепей с сильной индуктивной связью. Их основная отличительная особенность состоит в том, что плечи отношения представляют собой катушки с тесной индуктивной связью. Индуктивная связь между катушками  $L_1$  и  $L_2$ , характеризуемая взаимной индуктивностью  $M$  и коэффициентом связи  $K_c = \sqrt{L_1 L_2}$ , называется тесной, если  $K_c$  мало отличается от единицы, т. е. выполняется условие

$$M \approx \sqrt{L_1 L_2}.$$

Тесную индуктивную связь можно обеспечить путем намотки катушек на один сердечник из материала с большой магнитной проницаемостью. Такие катушки, используемые в мостовых схемах в качестве плечевых элементов, выполняются в виде специальных трансформаторов, что и обусловило название трансформаторных мостов.

Схема простейшего моста с трансформаторными плечами отношения приведена на рис. 2.17.

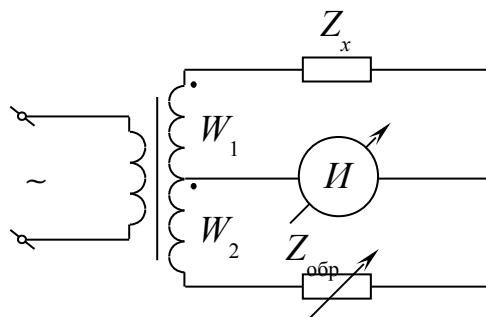


Рисунок 2.17 – Схема моста с трансформаторными плечами отношения

Условием равновесия рассматриваемой схемы является соотношение

$$Z_x/Z_{\text{обр}} = W_1/W_2. \quad (2.62)$$

Следовательно, мостовая схема, приведенная на рис. 2.17, может быть уравновешена переключением витков плечевых элементов.

В трансформаторных мостах расширение диапазона достигается за счет применения многосекционированных трансформаторов с ограниченным числом образцовых мер.

Еще более широкий диапазон измерения достигается при использовании двойных трансформаторных мостов (рис. 2.18).

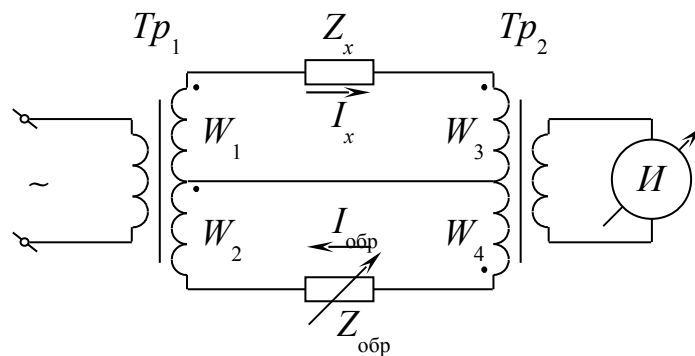


Рисунок 2.18 – Схема двойного трансформаторного моста

В схеме на рис. 2.18 трансформатор напряжения  $Tr_1$  обеспечивает подачу напряжения на измеряемое  $Z_x$  и образцовое  $Z_{\text{обр}}$  комплексное сопротивление. В цепь вторичной обмотки трансформатора тока  $Tr_2$  включен индикатор  $И$  (указатель равновесия), с помощью которого осуществляют сравнение токов  $I_x$  и  $I_{\text{обр}}$ . Обмотки  $W_1$  и  $W_2$  включены согласно, а  $W_3$  и  $W_4$  - встречно.

Условия равновесия схемы  $U_{\text{вых}} = 0$  выполняются при выполнении равенства

$$I_x W_3 = I_{\text{обр}} W_4,$$

или

$$U_x W_3 / Z_x = U_{\text{обр}} W_4 / Z_{\text{обр}},$$

откуда

$$Z_x = U_x W_3 Z_{\text{обр}} / U_{\text{обр}} W_4. \quad (2.63)$$

С учетом того, что  $U_x U_{\text{обр}} \approx W_1/W_2$ , (2.63) можно записать следующим образом:

$$Z_x = Z_{\text{обр}} W_1 W_3 / W_2 W_4.$$

Таким образом, уравнивание трансформаторной мостовой схемы достигается либо изменением чисел витков секционированных обмоток плечевых элементов, либо изменением значения образцовой меры, либо комбинацией обоих методов.

На рис. 2.19 представлена схема трансформаторного моста, уравнивание которого осуществляется коммутацией витков секционированной обмотки плечевого элемента  $W_2$ .

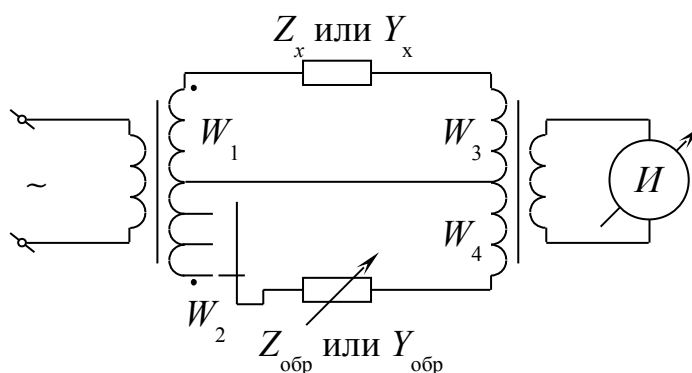


Рисунок 2.19 – Схема трансформаторного моста с секционированной обмоткой

Для этой схемы можно записать:

$$Z_x = 1/Y_x; \quad Z_{\text{обр}} = 1/Y_{\text{обр}},$$

или

$$Z_x = (Z_{\text{обр}}/W_2)(W_1 W_3/W_4);$$

$$Y_x = W_2 Y_{\text{обр}} W_4 / W_1 W_3.$$

Если измеряемый объект представляет собой активное сопротивление, то

$$Z_x = R_x = R_{\text{обр}} W_1 W_3 / W_2 W_4, \quad (2.64)$$

или

$$Y_x = G_x = W_2 G_{\text{обр}} W_4 / W_1 W_3.$$

Если измеряемый объект имеет емкостный характер, то



$$Y_x = j\omega C_x = W_{\text{обр}} j\omega C_{\text{обр}} W_4 / W_1 W_3,$$

или

$$C_x = W_{\text{обр}} C_{\text{обр}} W_4 / W_1 W_3. \quad (2.65)$$

Уравновешивание трансформаторного моста путем коммутации витков секционированных обмоток плечевых элементов при наличии одной образцовой меры часто не обеспечивает необходимую дискретность регулирования. Это вызывает необходимость увеличения числа образцовых мер и использования для каждой декады отдельных образцовых мер или применения других схемотехнических решений (вспомогательных трансформаторов и пр.).

Схема моста с использованием образцовых мер для каждой декады плечевого элемента приведена на рис. 2.20. Такая схема позволяет значительно повысить дискретность регулирования как по основному, так и по сопутствующему параметру.

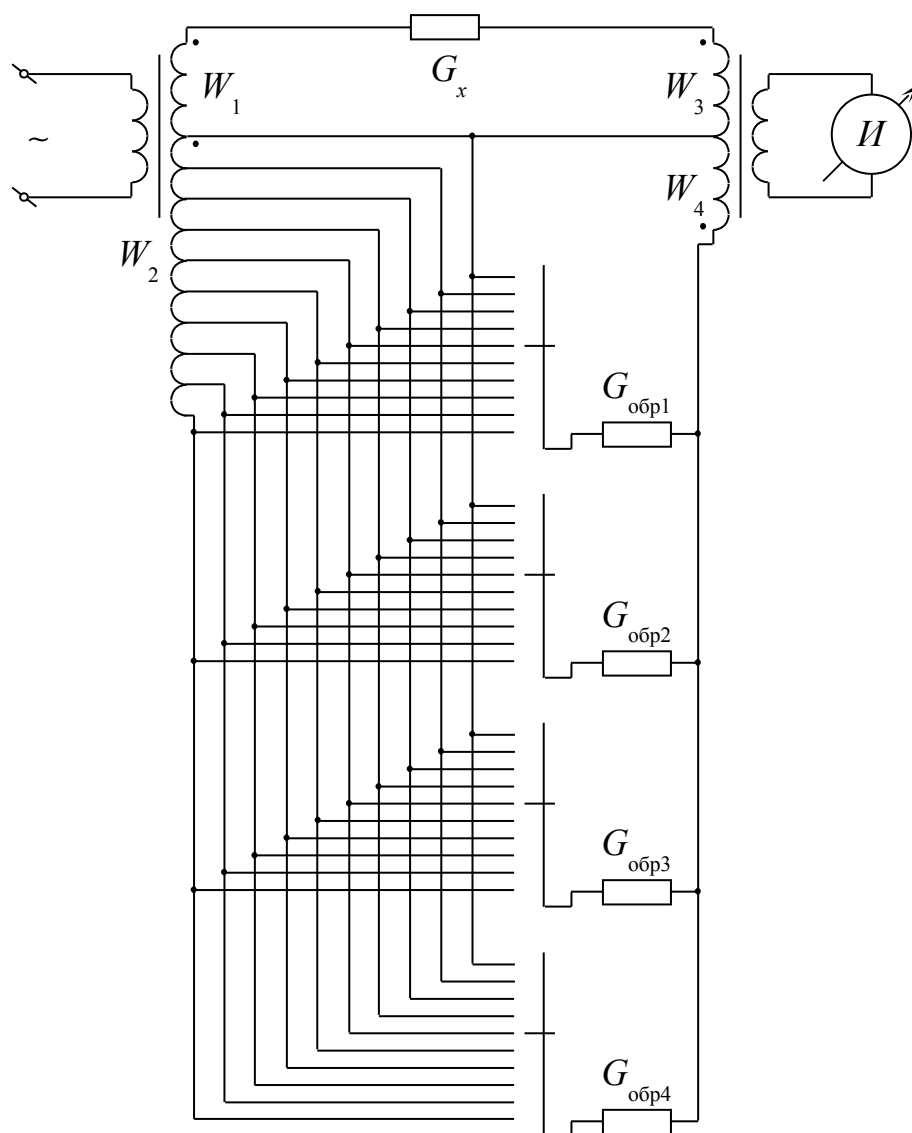


Рисунок 2.20 – Схема трансформаторного моста с образцовой мерой в каждой декаде

Трансформаторные мосты обеспечивают трех-, четырех- и пятизажимное включение измеряемого объекта и применяются для измерения индуктивности, емкости, сопротивления, проводимости и тангенса угла потерь с высокой точностью в широком диапазоне частот.

Погрешность измерений параметров трансформаторными мостами в диапазоне звуковых частот составляет 0,001 - 0,1%.

Верхний предел рабочих частот измерителей, созданных на базе трансформаторных мостовых схем, достигает 300 МГц.

Основными достоинствами мостов с индуктивно-связанными плечами по сравнению с обычными мостами являются:

- ♦ возможность уравнивания трансформаторных мостов переключением витков секционированных плечевых элементов при ограниченном числе образцовых мер, что позволяет создавать приборы с широким диапазоном измерений;
- ♦ более высокая температурная и временная стабильность отношения витков трансформаторных плечевых элементов по сравнению с отношением резистивных или емкостных плечевых элементов в обычных мостах;
- ♦ возможность повышения точности измерений за счет подбора образцовых мер с номинальными значениями, при которых можно ожидать достаточную их стабильность;
- ♦ высокая помехозащищенность трансформаторных мостов за счет малой чувствительности к шунтирующим паразитным импедансам, что позволяет проводить измерения при наличии длинных присоединительных кабелей.

Метод трансформаторного моста реализован в измерителях емкости Е8-4, Е8-5, а также в универсальных мостах Е7-8, Е7-10, Р5016 и др.

## 2.5. Другие методы измерения $RLC$

### 2.5.1. Метод дискретного счета

В основу метода положен апериодический процесс, возникающий при подключении заряженного конденсатора или катушки индуктивности с током к образцовому резистору. При измерении сопротивления обеспечивают разряд образцового конденсатора через измеряемый резистор [6].

Структурная схема измерителя емкости реализующая метод дискретного счета приведена на рис. 2.21.

Перед началом измерения ключ  $K_1$  находится в положении 1 и конденсатор  $C_x$  заряжается через ограничительный резистор  $R_d$  до значения стабилизированного источника напряжения  $E$ . В момент начала измерения  $t_1$  (рис. 2.22, а) управляющее устройство вырабатывает импульс, который сбрасывает предыдущие показания счетчика импульсов, перебрасывает триггер (см. рис. 2.21) из состояния 0 в состояние 1 и переводит ключ  $K_1$  в положение 2. Конденсатор  $C_x$  начинает разряжаться через образцовый резистор  $R_{обр}$  по экспоненциальному закону (рис. 2.22, б), который описывается выражением

$$U_C = Ee^{-(t-t_1)/\tau},$$

где  $\tau = R_{\text{обр}} C_x$  – постоянная времени цепи разряда.

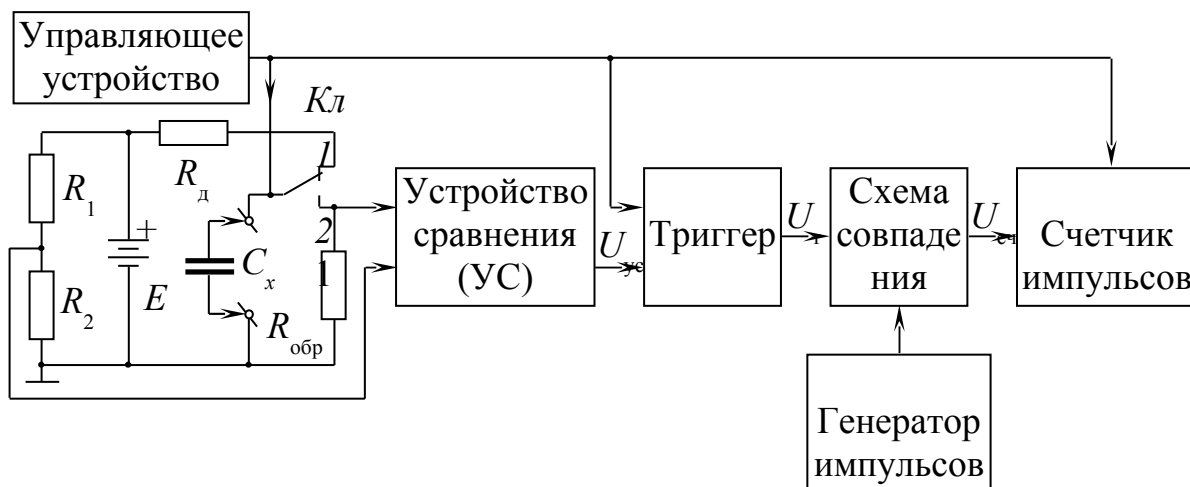


Рисунок 2.21 – Структурная схема измерителя емкости, реализующая метод дискретного счета

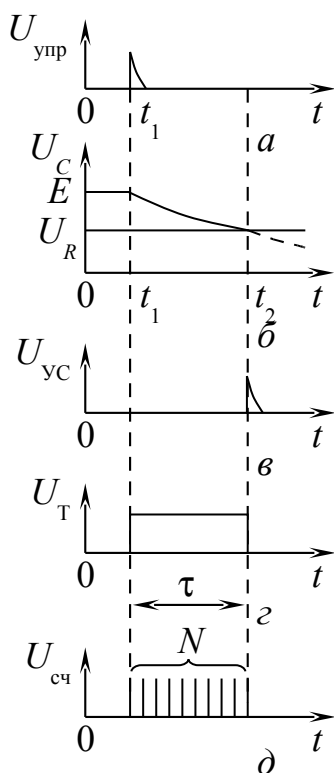


Рисунок 2.22 – Временные диаграммы, поясняющие работу схемы, приведенной на рис. 2.21

В момент  $t_1$  импульс с выхода триггера открывает схему совпадения и начинается счет импульсов генератора, следующих с частотой  $f$  на вход счетчика.

Напряжение  $U_C$  подается на один из входов устройства сравнения, ко второму входу устройства подводится напряжение с резистора  $R_2$  делителя, состоящего из резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , которое определяется выражением

$$U_R = R_2 E / (R_1 + R_2).$$

По мере разряда конденсатора напряжение  $U_C$  уменьшается и через промежуток времени  $\tau$  становится равным напряжению  $U_R$ . В момент  $t_2$  равенства этих напряжений (рис. 2.22, б) на выходе устройства сравнения возникает импульс (рис. 2.22, в), перебрасывающий триггер в исходное состояние (рис. 2.22, г), при котором закрывается вход схемы совпадения и счетчик прекращает подсчет импульсов (рис. 2.22, д).

Если  $t_2 - t_1 = \tau$ , то при  $U_C = U_R$  получим

$$e^{-t/\tau} = R_2/(R_1 + R_2),$$

или

$$R_2/(R_1 + R_2) = e^{-1} = 1/2,718 = 0,3679.$$

Таким образом, напряжение  $U_R$ , снимаемое с делителя  $R_1, R_2$ , должно иметь определенное значение, что достигается подбором резисторов  $R_1, R_2$ .

Если на счетчик поступило  $N$  импульсов, то можно записать

$$N = f\tau.$$

Так как  $\tau = R_{\text{обр}}C_x$ , то при фиксированных значениях  $f$  и  $R_{\text{обр}}$

$$C_x = N/R_{\text{обр}}f = K_1N, \quad (2.66)$$

т. е. измеряемая емкость прямо пропорциональна показанию счетчика  $N$ .

При наличии образцового конденсатора  $C_{\text{обр}}$  можно аналогичным образом измерить сопротивление резистора:

$$R_x = N/C_{\text{обр}}f = K_2N. \quad (2.67)$$

Погрешность измерений методом дискретного счета составляет 0,1–0,2% и зависит главным образом от нестабильности сопротивлений резисторов  $R_{\text{обр}}, R_1, R_2$  или конденсатора  $C_{\text{обр}}$ , нестабильности частоты генератора счетных импульсов, а также неточности срабатывания устройства сравнения.

К достоинствам метода можно отнести достаточно высокую точность измерений, а к недостаткам – невозможность измерения параметров на рабочей частоте.

Наибольшее применение метод дискретного счета нашел при создании цифровых измерителей емкостей и сопротивлений.

### 2.5.2. Метод косвенного измерения параметров $RLC$

Существенный недостаток цифрового измерителя емкости конденсатора, структура которого показана на рис. 2.21, удается устранить, используя схему, состоящую из измерительного генератора сигналов и

цифрового мультиметра с встроенной микропроцессорной системой. В этой схеме (рис. 2.23) емкость конденсатора можно измерить при любом значении частоты рабочего диапазона измерительного генератора, т. е. в конкретных условиях применения конденсатора.

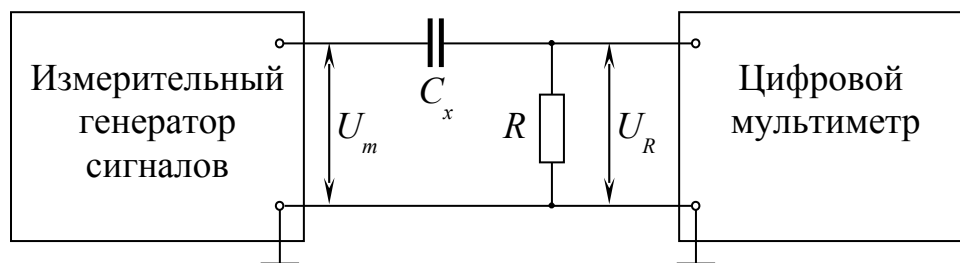


Рисунок 2.23 – Схема косвенного измерения параметров цепи

Значение емкости  $C_x$  конденсатора измеряется косвенным путем. Математическая зависимость между емкостью, сопротивлением резистора  $R$ , значением частоты  $f$  выходного сигнала генератора, амплитудой  $U_m$  и амплитудой  $U_R$  напряжения, падающего на резисторе, получается путем следующих рассуждений. Конденсатор и резистор в схеме, изображенной на рис. 2.23, образуют делитель напряжения. Следовательно,

$$U_R = U_m R / \sqrt{R^2 + (1/2\pi f C_x)^2}. \quad (2.68)$$

После несложных преобразований находим, что

$$C_x = 1 / 2\pi f R \sqrt{(U_m / U_R)^2 - 1}. \quad (2.69)$$

Входящие в это выражение значения  $R$ ,  $U_m$  и  $f$  вводятся в память микропроцессорной системы в качестве констант (нажатием соответствующих клавиш, расположенных на лицевой панели).

После этого прибор измеряет напряжение  $U_R$  и все вычисления проводятся по программе. Дисплей отображает результат косвенного измерения: емкость конденсатора при данном значении частоты  $f$ .

### 2.5.3. Микрофарадметры с равномерной шкалой

Микрофарадметр с равномерной шкалой может быть выполнен по схеме, аналогичной схемам емкостных частотомеров, в принципе отличаясь от последних лишь тем, что объектом измерений является не

частота, а емкость. Действие таких приборов базируется на измерении среднего значения тока заряда или разряда проверяемого конденсатора, перезаряжаемого напряжением известной частоты.

На рис. 2.24, *а* приведена схема измерительного блока микрофарадметра, питаемого импульсным напряжением  $u$  прямоугольной формы.

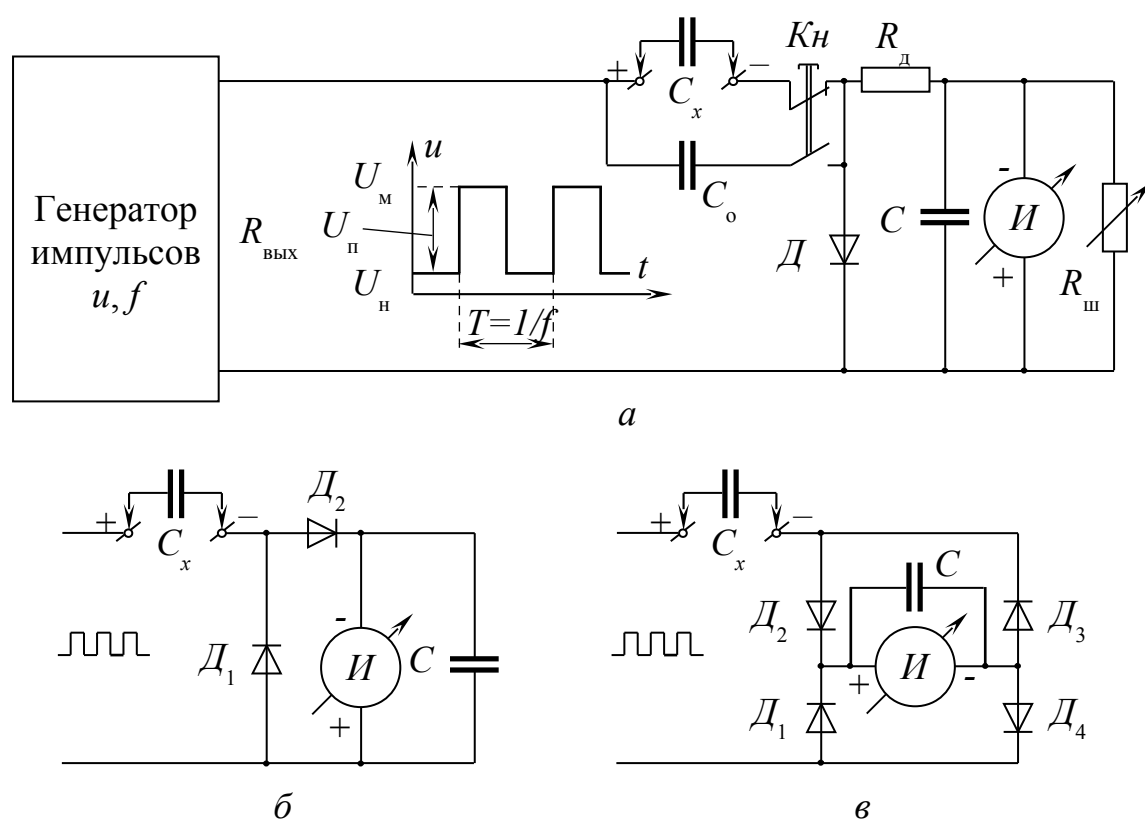


Рисунок 2.24 – Схемы измерительных блоков микрофарадметров с равномерной шкалой

Во время действия импульса через диод  $D$  происходит заряд конденсатора  $C_x$  до максимального напряжения  $U_m$ . В интервале между импульсами конденсатор разряжается через измеритель (магнитоэлектрический микроамперметр)  $I$  до начального напряжения  $U_n$ . В установившемся режиме при частоте повторения входных импульсов  $f$  и их амплитуде  $U_n = U_m - U_n$  среднее значение протекающего через измеритель тока  $I_x = C_x U_n f$ . При фиксированных значениях  $U_n$  и  $f$  измеритель можно снабдить равномерной шкалой с отсчетом в значениях  $C_x$  в соответствии с формулой

$$C_x = I_x / (U_n f). \quad (2.70)$$

## Предельное значение измеряемых емкостей

$$C_{\text{п}} = I_{\text{и}} / (U_{\text{п}} f), \quad (2.71)$$

где  $I_{\text{и}}$  – ток полного отклонения измерителя. Для сглаживания пульсаций и устранения колебаний стрелки измерителя служит конденсатор  $C$ , сопротивление которого при частоте  $f$  должно быть значительно меньшим сопротивления  $R_{\text{и}}$  измерителя.

Результаты не изменятся, если измеритель включить в цепь зарядного тока последовательно с диодом  $D2$  (рис. 2.24, б); тогда разрядный ток конденсатора  $C_x$  будет замыкаться через диод  $D1$ . При измерении малых емкостей иногда применяют двухполупериодную схему включения измерителя (рис. 2.24, в). В этом случае через измеритель протекают и зарядный и разрядный токи, что позволяет получить требуемый предел измерений при напряжении  $U_{\text{п}}$  или частоте  $f$ , вдвое меньших, чем в схемах с однополупериодным включением измерителя.

Пределы измерений прибора задаются значениями  $C_{\text{п}}$  и для их обеспечения при переключении пределов изменяют частоту повторения импульсов источника питания, определяемую формулой

$$f = I_{\text{и}} / (U_{\text{п}} C_{\text{п}}). \quad (2.72)$$

Перед началом измерений на каждом пределе должна производиться калибровка микрофарадметра, для чего к нему нажатием кнопки  $K_{\text{н}}$  присоединяют конденсатор емкостью  $C_0 = C_{\text{п}}$  (рис. 2.24, а); при этом добиваются отклонения стрелки измерителя до конца шкалы посредством плавной регулировки частоты  $f$ , амплитуды импульсов  $U_{\text{п}}$  или чувствительности измерителя (например, с помощью шунтирующего реостата  $R_{\text{ш}}$ ). Поскольку шкала прибора равномерна, то погрешность измерения емкостей в основном определяется погрешностью подбора опорной емкости  $C_0$ , отклонение которой от требуемого номинала ( $C_{\text{п}}$ ) не должно превышать 1–5%.

Для получения правильных результатов измерений необходимо, чтобы за один период входного напряжения  $u$  конденсатор  $C_x$  успевал полностью зарядиться и разрядиться (в пределах напряжений  $U_{\text{м}} - U_{\text{н}}$ ). Легче всего это обеспечивается при прямоугольной форме входных импульсов и надлежащем выборе частоты, их повторения  $f$ .



Как известно, в цепи, состоящей из элементов  $R$  и  $C$ , длительность заряда (разряда) конденсатора  $C$  до значения приложенного к этой цепи постоянного напряжения определяется постоянной времени  $\tau = RC$  и практически не превосходит  $5\tau$ . Для того чтобы заряд (разряд) заканчивался в течение полупериода  $T/2$  напряжения частоты  $f$ , необходимо выполнение условия

$$5RC = 5\tau \leq T/2 = 1/(2f),$$

которое удовлетворяется при частоте

$$f \leq 1/(10RC). \quad (2.73)$$

Сопротивление резистора  $R_d$  (рис. 2.24, *a*) берется таким, чтобы сопротивление цепи измерителя  $R_d + R_{\text{и}}$  значительно превышало (по крайней мере, в десятки раз) прямое сопротивление диода  $D$ ; в то же время оно не должно увеличивать общее сопротивление цепи разряда сверх допустимого значения (10 кОм). Если оба условия не удастся одновременно удовлетворить, то резистор  $R_x$  заменяют диодом, пропускающим ток разряда; при этом измеритель оказывается включенным по схеме на рис. 2.24, *б, в*.

Микрофарадметры рассматриваемого типа обычно имеют верхние пределы измерений  $C_{\text{п}}$  не менее 100 пФ из-за трудности генерирования прямоугольных импульсов с высокой частотой повторения и влияния паразитных связей. Трудности возникают и при расширении диапазона измерений в сторону больших емкостей. Например, при выборе верхних значений пределов  $C_{\text{п}} = 1$  и 10 мкФ, согласно условию (2.72), требуется питать схему импульсами с частотами повторения соответственно 10 и 1 Гц, однако при этом отсчет по измерителю становится невозможным из-за сильных вибраций его стрелки, которые не удастся устранить увеличением емкости конденсатора  $C$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принципы измерения емкости методом амперметра-вольтметра.
2. Схемы измерения индуктивности и взаимной индуктивности.
3. Резонансный метод измерения емкости и индуктивности.
4. Принцип работы и схема куметра.
5. Схемы измерения индуктивности и емкости методом двух генераторов.
6. Погрешности измерения емкости и индуктивности резонансными методами.
7. Условия равновесия моста переменного тока. Чувствительность мостовых методов.
8. Мосты переменного тока для измерения емкости и угла потерь конденсаторов.
9. Измерение индуктивности и добротности катушки индуктивности мостовыми методами.
10. Шестиплечные мосты. Функция преобразования.
11. Трансформаторные мосты для измерения параметров двухполюсников.
12. Методы измерения индуктивности и емкости с промежуточным преобразованием.

### 3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ $RLC$

### 3.1. Общие сведения

Целью лабораторного практикума является изучение принципа действия приборов для измерения на переменном токе индуктивностей, емкостей, активных сопротивлений, диэлектрических потерь электрической емкости и добротности катушек индуктивности, а также приобретение практических навыков работы с измерительными приборами.

Используя техническое описание и инструкцию по эксплуатации, для конкретного прибора, которые находятся на рабочем месте, ознакомиться с техническими данными, основными характеристиками и условиями эксплуатации, а также изучить принцип действия по функциональным и принципиальным схемам прибора и его основных узлов.

Для каждой лабораторной работы объект исследования и условия измерения задает преподаватель.

### 3.2. Измерение параметров $RLC$ при помощи универсального измерителя типа Е7-11

Внешний вид лицевой панели универсального измерителя Е7-11 с обозначением всех органов управления приведен на рис. 3.1. С назначением органов управления и индикаторов отсчета результатов измерения ознакомиться по техническому описанию прибора.

### 3.2.1. Подготовка к проведению измерений

Переключатель «СЕТЬ» поставьте в положение «ВКЛ.». При этом должна загореться индикаторная лампочка. Измеритель готов к работе через 15 мин.

Проверка работоспособности в режиме измерения емкости и оценка начальной емкости измерителя:

- ✓ установите переключатель «L, C, R ~, R ==» в положение «C» и переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в крайнее правое положение (7-й предел);
- ✓ ручкой «ЧУВСТВИТ.» установите стрелку индикатора баланса в пределах 2/3 шкалы;

- ✓ вращая ручку плавного отсчета «МНОЖИТЕЛЬ» и постепенно увеличивая чувствительность индикатора, сбалансируйте мост, то есть добейтесь минимальных показаний индикатора.



Рисунок 3.1 – Внешний вид лицевой панели прибора E7-11

Полученное значение емкости соответствует начальной емкости моста и не должно превышать 0,5 пФ (отсчет по шкале множителя 0,05). Начальная емкость должна вычитаться из измеренных значений емкости меньше 1000 пФ, если требуется получить максимально возможную точность измерений.

Проверка работоспособности в режиме измерения индуктивности и оценка остаточной индуктивности прибора:

- ✓ поставьте переключатель «L, C, R ~, R ==» в положение «L» и переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в крайнее левое положение (1-й предел), переключатель «Q<0,5; Q>0,5; tg δ» в положение «tg δ»;
- ✓ замкните концы соединительного кабеля измерителя медной или алюминиевой пластиной шириной не менее 2 мм или проводом соответствующего диаметра;
- ✓ ручкой «ЧУВСТВИТ.» установите стрелку индикатора в пределах 2/3 шкалы;
- ✓ попеременным вращением ручки плавного отсчета «МНОЖИТЕЛЬ» и ручки «tg δ» добейтесь минимума показаний индикатора при постепенном увеличении чувствительности индикатора.

Полученное значение индуктивности соответствует остаточной индуктивности мостовой схемы. Это значение должно вычитаться из результатов измерения малых величин индуктивностей (меньше 100 мкГ) для увеличения точности измерения. Остаточная индуктивность не должна превышать 0,5 мкГ (отсчет по шкале «МНОЖИТЕЛЬ» 0,05).

Проверка работоспособности в режиме измерения сопротивлений и оценки начального сопротивления мостовой схемы прибора:

- ✓ переведите переключатель «L, C, R ~, R ==» в положение «R ~»; ручкой «ЧУВСТВИТ.» установите стрелку индикатора в пределах 2/3 шкалы;
- ✓ сбалансируйте мост вращением ручки плавной шкалы «МНОЖИТЕЛЬ» при замкнутых зажимах соединительного кабеля и при постепенном увеличении чувствительности до максимального значения.

Полученное значение сопротивления соответствует начальному сопротивлению моста и не должно превышать 0,5 Ом (отсчет 0,05 по шкале «МНОЖИТЕЛЬ»). Это значение должно вычитаться из результата измерения при измерении малоомных объектов (до 10 - 100 Ом).

В процессе балансирования может оказаться, что чувствительность индикатора баланса максимальна, отсчет по шкале «МНОЖИТЕЛЬ» уменьшен до нулевого значения, а четкого минимума нет. В этом случае следует считать мост сбалансированным и остаточное сопротивление принять равным нулю.

Процесс измерения заключается в уравнивании мостовой измерительной схемы с целью достижения ею баланса, определяемого по индикатору баланса. При измерении сопротивлений индикатор баланса представляет собой фазовый детектор. Состоянию баланса моста соответствует нулевое показание стрелочного прибора фазового детектора.

При измерении емкостей и индуктивностей индикатором баланса является амплитудный детектор. При балансе моста стрелка индикатора не всегда совпадает с нулевой риской шкалы. Уравновешивая мост в этом случае поочередным вращением ручек шкал реактивности и потерь, нужно получить минимум показаний индикатора при постепенном увеличении чувствительности до величины, обеспечивающей индикацию изменения отсчета измеряемой величины не менее, чем на половину основной погрешности измерения. Вследствие излишней чувствительности на отдельных участках диапазона измерений стремиться к достижению минимума при максимальной чувствительности индикатора не следует.

Отсчет результата измерения емкости, индуктивности и сопротивления производится по общему отсчетному устройству «МНОЖИТЕЛЬ», имеющему две шкалы. Показания одной шкалы меняются ступеньками, другой – плавно. Показания обеих шкал образуют единый строчечный цифровой отсчет. Отсчет, изображенный на рис. 3.2, а, должен быть прочтен как 0,275.

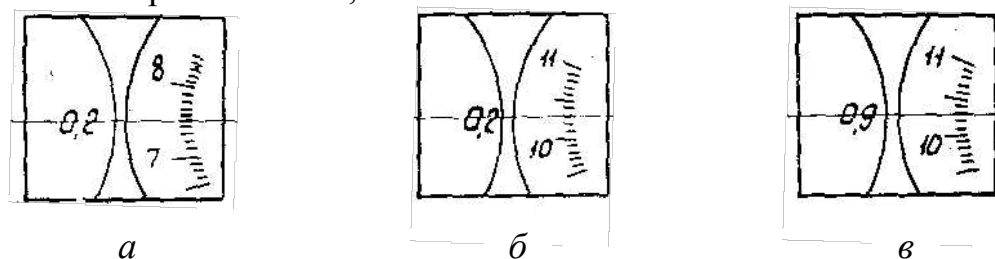


Рисунок 3.2. – Отсчет результатов измерений  $L$ ,  $C$ ,  $R$

Если показание на плавной шкале больше или равно 10, то это означает, что единица должна быть перенесена (добавлена) в предыдущий разряд отсчета, то есть отсчет, изображенный на рис. 3.2, б, следует прочесть как 0,303. Аналогично отсчет, представленный на рис. 3.2, в, соответствует значению 1,003.

В табл. 3.1. приведены диапазоны измерений параметров  $RLC$  прибором Е7-11 и наибольшая основная погрешность измерения

Таблица 3.1– Диапазоны измерений параметров  $RLC$

Сопротивление $R_x$	0,1 – 10 Ом	$\pm(2+2/R)\%$
	10 Ом – 1 МОм	$\pm(1+2/R)\%$
	1 – 10 МОм	$\pm(2+2/R)\%$
Индуктивность $L_x$ ( $Q \geq 1$ )	0,3 – 100 мкГн	$\pm(2+10/L)\%$
	100 мкГн – 10 Гн	$\pm 1\%$
	10 – 1000 Гн	$\pm 2\%$
Индуктивность $L_x$ ( $Q < 1$ )	0,3 – 100 мкГн	$\pm(2+10/L+1/Q)\%$
	100 мкГн – 10 Гн	$\pm(1+1/Q)\%$
	10 – 1000 Гн	$\pm(2+1/Q)\%$
Емкость $C_x$ ( $\text{tg } \delta \leq 0,1$ )	0,5 – 1000 пФ	$\pm(1+20/C)\%$
	1000 пФ – 10 мкФ	$\pm 1\%$
	10 мкФ – 1000 мкФ	$\pm 2\%$
Добротность $Q$	0,1 - 30	$\pm(10+0,5Q)\%$
Тангенс угла потерь $\text{tg } \delta$	0,005 – 0,1	$\pm(0,1 \text{tg } \delta + 5 \cdot 10^{-3})\%$

### 3.2.2. Опыт 1. Измерение сопротивлений на переменном токе

Подсоедините измеряемый объект к зажимам соединительного кабеля L, C, R.

Переключатель «L, C, R ~, R ==» установите в положение «R ~», переключатель «ЧАСТОТА Hz» – в положение, соответствующее частоте, на которой предполагается проводить измерения (при установке переключателя в положение «100» загорается сигнальная лампочка «С, L×10»).

Переключатель «ПРЕДЕЛЫ» поставьте в крайнее левое положение (первый предел).

Ручку «ЧУВСТВИТ.» установите в крайнее правое положение.

Выберите нужный предел измерения. Для этого вращением ручки «ПРЕДЕЛЫ» поочередно меняйте установленный предел до тех пор, пока знак напряжения разбаланса на индикаторе баланса не изменится на противоположный. Это и будет нужный для измерений предел.

Уравновесьте мост вращением ручек «МНОЖИТЕЛЬ», постепенно увеличивая чувствительность до величины, обеспечивающей индикацию разбаланса на 1/2 погрешности намерения для данной величины.

Измеренная величина сопротивления равна произведению отсчета по шкалам «МНОЖИТЕЛЬ» на значение сопротивления, соответствующее выбранному пределу и указанное в таблице на передней панели прибора.

Например:

Отсчет по шкалам «МНОЖИТЕЛЬ» – 0,127.

Предел измерения – 3. По таблице ему соответствует значение 1 кΩ.

Следовательно, измеренная величина сопротивления будет  $R = 0,127 \times 1 \text{ кОм} = 127 \text{ Ом}$ .

При измерении малоомных объектов (меньше 10 - 100 Ом) результат должен быть уменьшен на величину остаточного сопротивления мостовой схемы, определенную по методике подраздела 3.2.1.

В опыте необходимо измерить сопротивления, номера которых задаются преподавателем, а результат измерений с указанием наибольших погрешностей (см. табл. 3.1) занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерений

№ образца	Результат измерения $R_x$	Наибольшая основная погрешность		Результат измерения с указанием
		Относительная,	Абсолютная,	

		$\delta, \%$	$\Delta R, \text{Ом}$	погрешности

### 3.2.3. *Опыт 2. Измерение емкости и тангенса угла потерь конденсатора*

Подсоедините измеряемый объект к соединительным кабелям прибора.

Поставьте:

- ♦ переключатель «L, C, R ~, R ==» в положение «C»;
- ♦ переключатель « $Q < 0,5$ ;  $Q > 0,5$ ;  $\text{tg } \delta$ » в положение « $\text{tg } \delta$ »;
- ♦ переключатель «ЧАСТОТА Hz» в положение, соответствующее частоте, на которой будут вестись измерения;
- ♦ переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в крайнее правое положение (7-й предел);
- ♦ шкалу « $\text{tg } \delta$ » на нулевое значение;
- ♦ ручку «ЧУВСТВИТ.» в крайнее правое положение.

Выберите нужный предел измерения. Для этого на шкале «МНОЖИТЕЛЬ» установите отсчет 1,090. Нажмите кнопку «ВЫБОР ПРЕДЕЛА» и вращением ручки «ПРЕДЕЛЫ» влево меняйте установленный предел до тех пор, пока знак фазы напряжения разбалансируется на индикаторе прибора не изменится на противоположный. Это будет предел, на котором должны производиться измерения.

Отпустив кнопку «ВЫБОР ПРЕДЕЛА», произведите уравнивание моста. Для этого уменьшайте показания шкалы переключателя «МНОЖИТЕЛЬ» до получения минимума показаний индикатора баланса, затем вращением плавной шкалы «МНОЖИТЕЛЬ» найдите положение, при котором минимум станет еще меньше. Если вращение плавной шкалы не меняет показаний индикатора, перейдите к уравниванию моста по потерям. Найдя минимум, вновь возвратитесь к уравниванию по емкости. Регулировки повторяются при постепенном увеличении чувствительности до величины, обеспечивающей индикацию изменения отсчета по шкалам не менее половины основной погрешности измерения.

Достигнув минимума при такой чувствительности, произведите отсчет результата измерения. Измеренная величина емкости равна отсчету



по шкале «МНОЖИТЕЛЬ», умноженному на значение емкости, указанное в таблице передней панели для соответствующего положения переключателя «ПРЕДЕЛЫ».

Если измерение проводилось на частоте 100 Гц, отсчет результата измерения емкости должен быть увеличен в 10 раз.

При измерении емкостей ниже 1000 пФ следует вводить поправку на начальную емкость мостовой схемы: уменьшить измерения на величину начальной емкости.

Измеренная величина тангенса угла потерь отсчитывается непосредственно по шкале «tg  $\delta$ ».

В опыте необходимо измерить емкость и тангенс угла потерь конденсаторов, номера которых задаются преподавателем. Результаты измерений с указанием погрешностей (см. табл. 3.1) занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты измерений с указанием погрешностей

№ образца	Результат измерения $C_x$	Наибольшая основная погрешность		Результат измерения с указанием погрешности $C_0 = C_x \pm \Delta C$	№ образца	Результат измерения tg $\delta_x$	Наибольшая основная погрешность		Результат измерения с указанием погрешности tg $\delta = \text{tg } \delta_x \pm \Delta \text{tg } \delta$
		Относительная, $\delta$ , %	Абсолютная, $\Delta C$				Относительная, $\delta$ , %	Абсолютная, $\Delta \text{tg } \delta$	

#### 3.2.4. Опыт 3. Измерение индуктивности и добротности катушки

Подсоедините измеряемый объект и произведите установку переключателей:

«L, C, R ~, R ==» в положение «L»;

« $Q < 0,5$ ;  $Q > 0,5$ ;  $\text{tg } \delta$ » в положение « $\text{tg } \delta$ »;

«ЧАСТОТА Hz» в положение, соответствующее частоте, на которой должны производиться измерения;

«ПРЕДЕЛЫ» в крайнее левое положение;

ручку «ЧУВСТВИТ.» поставьте в крайнее правое положение;

выберите нужный предел измерения. Для этого на шкале отсчета «МНОЖИТЕЛЬ» установите показание 1,090. Нажмите кнопку «ВЫБОР ПРЕДЕЛА» и вращая вправо ручку переключателя «ПРЕДЕЛЫ», найдите предел, при котором знак фазы напряжения разбаланса на стрелочном приборе изменится на противоположный. Отпустив кнопку «ВЫБОР ПРЕДЕЛА» и переведя переключатель « $\text{tg } \delta$ » в положение «Q», произведите уравнивание мостовой схемы, добившись поочередным вращением ручек шкалы «МНОЖИТЕЛЬ» и шкалы «Q» минимальных показаний индикатора баланса при постепенном увеличении чувствительности до величины, обеспечивающей индикацию разбаланса на 1/2 величины основной погрешности измерения. Произведите отсчет результата измерения. Если отсчет результата измерения на шкале «МНОЖИТЕЛЬ» получился с двумя или тремя нулями впереди, нужно, не меняя отсчета по шкале «Q», перевести переключатель пределов на одно или два положения соответственно влево и повторить измерение на этом пределе.

Измеренная величина индуктивности равна отсчету по шкале «МНОЖИТЕЛЬ», умноженному на значение индуктивности, указанное в таблице на лицевой панели, в соответствии с положением переключателя «ПРЕДЕЛЫ».

При измерениях на частоте 100 Гц отсчет измерения индуктивности должен быть увеличен в 10 раз.

В измеренную величину индуктивности ниже 100 мкГ следует ввести поправку на начальную индуктивность мостовой схемы.

Измеренная величина добротности отсчитывается непосредственно по соответствующей шкале «Q».

Особенности работы при измерении объектов с низкой добротностью ( $Q < 1$ )

При измерении таких объектов возникают некоторые трудности в правильном нахождении баланса моста. При уравнивании моста в этом случае следует придерживаться такой методики:

- найдя минимум индикатора, разбалансируйте мост по реактивности на 10–20 делений шкалы в какую-нибудь сторону;
- вращая шкалу «Q», уравновесьте мост и, если минимум индикатора не стал глубже (показание индикатора меньше), произведите разбалансировку моста по реактивности, в другую сторону;
- если минимум стал более глубоким, поверните шкалу активности в том же направлении еще на несколько делений вновь вращением шкалы «Q» уравновесьте мост и проверьте показания индикатора.

Такой процесс повторяйте до тех пор, пока будет происходить уменьшение показаний индикатора.

В опыте необходимо измерить индуктивность и добротность катушек индуктивностей, номера которых задаются преподавателем. Результаты измерений с указанием погрешностей (см. табл. 3.1) занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты измерений с указанием погрешностей

№ образца	Результат измерения $L_x$	Наибольшая основная погрешность		Результат измерения с указанием погрешности $L_0 = L_x \pm \Delta L$	№ образца	Результат измерения $Q_x$	Наибольшая основная погрешность		Результат измерения с указанием погрешности $Q = Q_x \pm \Delta Q$
		Относительная, $\delta, \%$	Абсолютная, $\Delta L$				Относительная, $\delta, \%$	Абсолютная, $\Delta Q$	

### 3.3. Практическая работа с прецизионными мостами переменного тока типа BM400G и BM401E

Внешний вид с обозначением элементов управления и индикации приборов BM401E и BM400G приведены на рис. 3.3 и 3.4. С назначением элементов управления и индикаторами, а также особенностями работы и эксплуатации приборов, ознакомиться по техническому описанию, которое находится на рабочем месте.



Рисунок 3.3 – Внешний вид лицевой панели прибора BM401E



Рисунок 3.4 – Внешний вид лицевой панели прибора BM400G

В табл. 3.5. приведены диапазоны измерений параметров мостами BM401E и BM400G и наибольшая основная погрешность измерения

Таблица 3.5 – Диапазоны измерений параметров

BM401E	$L_x$	1 мкГн – 10 Гн 10 Гн – 1000 Гн	$\pm 0,3\%$ $\pm 0,5\%$
	$R_x$	0,01 Ом – 1 МОм	$\pm 3\%$
	$C_x$	1000 пФ – 10 мкФ 10 мкФ – 1000 мкФ	$\pm 0,3\%$ $\pm 0,5\%$
	$G_x$	10 мкСм – 1 См	$\pm 3\%$
BM400G	$C_x$	0,1 – 10 пФ	$\pm 1\%$
		10 пФ – 10 мкФ	$\pm 0,1\%$
		10 мкФ – 100 мкФ	$\pm 1\%$
	$\text{tg } \delta_x$	для $C_x \leq 10$ мкФ	$\pm 5\%$
		для $C_x > 10$ мкФ	$\pm 10\%$

### *3.3.1 Опыт 1. Измерение параметров индуктивности мостом ВМ401Е*

Включить выключатель "Сеть" в положение "1", через 15 мин. прибор готов к работе.

Заданную преподавателем индуктивность подключить к измерительным зажимам " $L_x R_x$ " (см. рис. 3.3).

Поляризационные зажимы J должны быть закорочены. Переключатель выхода источника фиксированной частоты Е установить в положение "I".

Переключатель диапазонов и функций М переключить в положение "L", которое фиксируется в большом окошечке, и приблизительный диапазон измеряемой индуктивности. Диапазон определяется по показателю в малом окошечке.

Положение первых ступеней декадных магазинов, определяющих величину индуктивности и последовательного сопротивления, установить при помощи ручек I и H в пятое положение.

Переключателями "32Гц, 80Гц, 800Гц" на источнике фиксированной частоты С и на избирательном усилителе Q установить значение рабочей частоты, заданное преподавателем.

Переключатель функций F милливольтметра установить в положение "ИЗМЕРЕНИЕ".

При помощи переключателя О проводят грубую установку, а при помощи потенциометра Р тонкую настройку требуемой чувствительности, т.е. устанавливают отклонение стрелки индикатора на 2/3 шкалы.

При помощи переключателя функций и диапазонов М подыскивают подходящий диапазон измерения по минимуму отклонения стрелки индикатора.

Точное уравнивание моста при максимальной чувствительности и минимальном отклонении стрелки индикатора добиваются с помощью поочередного последовательного (от старшей декады к младшей) изменения декадных магазинов I и H.

Численное значение индуктивности  $L_x$  в мГн и  $R_x$  в Ом считывают из показаний в окошках для соответствующих декад I и H, умноженные на показатель диапазона М.

В опыте необходимо измерить параметры катушек индуктивности, номера которых задаются преподавателем.

Результаты измерений, а также необходимых расчетов параметров с указанием погрешностей (согласно табл. 3.5) занести в табл. 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты измерений

№ образца	Результаты измерений		Результат расчета	Результат измерения с указанием погрешности		
	$L_x$	$R_x$	$Q_x = \omega L_x / R_x$ $\omega = 2\pi f$	$L = L_x \pm \Delta L$	$R = R_x \pm \Delta R$	$Q = Q_x \pm \Delta Q$

### 3.3.2 Опыт 2. Измерение параметров конденсатора с помощью моста ВМ401Е

Присоединить измеряемый конденсатор к зажимам "С<sub>х</sub>, G<sub>х</sub>" (см. рис. 3.3)

Переключателями "32Гц, 80Гц, 800Гц" на источнике фиксированной частоты и на избирательном усилителе установить значение рабочей частоты, заданное преподавателем.

Переключатель функций F милливольтметра установить в положение "ИЗМЕРЕНИЕ".

При помощи переключателя О проводят грубую установку, а при помощи потенциометра Р тонкую настройку требуемой чувствительности, т.е. устанавливают отклонение стрелки индикатора на 2/3 шкалы.

При помощи переключателя функций и диапазонов М подыскивают подходящий диапазон измерения по минимуму отклонения стрелки индикатора.

Точное уравнивание моста при максимальной чувствительности и минимальном отклонении стрелки индикатора добиваются с помощью поочередного последовательного (от старшей декады к младшей) изменения декадных магазинов I и H.

Численное значение емкости С<sub>х</sub> в мкФ и G<sub>х</sub> в мкСм считывают из показаний в окошках для соответствующих декад и умноженные на показатель диапазона.

В опыте необходимо измерить параметры конденсаторов, номера которых задаются преподавателем.

Результаты измерений, а также необходимых расчетов параметров с указанием погрешностей (согласно табл. 3.5) занести в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты измерений

образца №	Результаты измерений		Результат расчета	Результат измерения с указанием погрешности		
	$C_x$	$G_x$	$\operatorname{tg} \delta = G_x / \omega C_x$ $\omega = 2\pi f$	$C = C_x \pm \Delta C$	$G = G_x \pm \Delta G$	$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_x \pm \Delta \operatorname{tg} \delta$

### 3.3.3 Опыт 3. Измерение параметров конденсатора с помощью моста BM400G

Включить прибор нажатием кнопки "Сеть", через 15 мин. прибор готов к работе.

Мост BM400G (см. рис. 3.4) позволяет измерять проходную и заземленную емкости, а также симметричную относительно земли. Режим измерения задается переключателем рода работы О.

Для измерения проходной емкости переключатель рода работ О следует установить так, чтобы знак земли находился в правом окошке.

Переключатель R установить в  $10^7$ , первый декадный переключатель L (предел  $\times 1$ ) в положение 1, остальные элементы управления, предназначенные для компенсации емкости и потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ), установить на нуль.

С помощью соединительных кабелей присоединить измеряемую емкость к зажимам М. Экранированный провод кабеля подсоединить к зажиму N.

Переключатель пределов R вращать до тех пор, пока стрелка индикатора не перейдет из левого положения в правое. В этом случае найден порядок (определен диапазон) искомого значения конденсатора. Далее следует вращать первый декадный переключатель L (предел  $\times 1$ ) до тех пор, пока стрелка измерительного прибора не отклонится в другую сторону. Затем следует на одно положение вернуться и производить компенсацию с помощью переключателей L (пределы  $\times 0,1$  и  $\times 0,01$ ) и в заключение осуществляется тонкая компенсация ручкой Q.

Нажать на кнопку  $\operatorname{tg} \delta$  (E) и произвести компенсацию потерь ручкой Т или ручкой S. Кнопку E отпустить и уточнить величину емкости с последующим уточнением значения потерь  $\operatorname{tg} \delta$ .

Плавная компенсация  $\operatorname{tg} \delta$  в пределах  $0 - 2 \cdot 10^{-2}$  осуществляется с помощью воздушного конденсатора Т, грубая компенсация  $\operatorname{tg} \delta$  осуществляется посредством переключателя S. Компенсация  $\operatorname{tg} \delta$  зависит от частоты, причем для частот 200 Гц, 800 Гц, 2 кГц и 5 кГц значение  $\operatorname{tg} \delta$



отсчитывается прямо. На других частотах в диапазоне 200Гц – 10 кГц необходимую величину  $\operatorname{tg} \delta$  определяют по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta' \cdot \frac{f_m}{f},$$

где  $\operatorname{tg} \delta'$  – полученное значение с помощью моста;  $f_m$  – частота измерения в диапазоне 200Гц – 10 кГц;  $f$  – установленная частота переключателем  $\operatorname{tg} \delta$  (S).

Способы измерения заземленной емкости и симметричной относительно земли аналогичен способу измерения проходной емкости. При измерении заземленной емкости переключатель рода работ О установить в положение, при котором знак заземления находится в левом окошке, а при измерении симметричной емкости переключатель рода работ О установить в положение "Сим. объект".

При проведении измерений необходимо устанавливать чувствительность в соответствии с требуемой точностью, чтобы сократить время измерения.

В опыте схему измерения и номера конденсаторов, параметры которых необходимо измерить, задает преподаватель.

Результаты измерений, а также необходимых расчетов с указанием погрешностей (согласно табл. 3.5) занести в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты измерений

№ образца	Схема включения емкости	Результаты измерений			Результат измерения с указанием погрешности	
		$f$	$C_x$	$\operatorname{tg} \delta_x$	$C = C_x \pm \Delta C$	$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_x \pm \Delta \operatorname{tg} \delta$

#### 3.3.4. Опыт 4. Измерение емкости по методу сравнения с помощью моста BM400G

Измерение осуществляется с помощью двух значений емкости, которые могут быть подключены в качестве проходных или заземленных.

Переключатель S устанавливается в положение «Диф.». Ручку точной компенсации Т установить в такое положение, чтобы показание по нижней шкале, градуированной в единицах проводимости, было равно нулю.

С помощью соединительных кабелей подключить одну емкость к зажимам  $C_x$  (М), а вторую – к зажимам  $C_n$  (N). Большую емкость следует всегда подключать к зажимам  $C_x$ .

Компенсация емкости осуществляется с помощью дифференциального конденсатора Q или с помощью переключателя грубо L (предел  $\times 0,01$ ). Коэффициент потерь отсчитывается по нижней шкале, градуированной в единицах проводимости. Шкала справедлива для частоты 800 Гц. Для другой частоты следует пользоваться выражением:

$$\Delta G = \Delta G' \frac{(f_m)^2}{800^2} = \Delta G' \cdot 1,56 f_m,$$

где

$f_m$  – частота измерения (кГц) и  $\Delta G$  – значение проводимости, отсчитанное на частоте  $f_m$ .

В опыте номера конденсаторов, параметры которых необходимо измерить, задает преподаватель.

Результаты измерений, а также необходимых расчетов с указанием погрешностей (согласно табл. 3.5) занести в табл. 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты измерений

№ образца	Параметры образцового конденсатора	Результаты измерений			Результаты измерения с указанием погрешности	
		$f$	$C_x = C_n \pm \Delta C$	$G_x = G_n \pm \Delta G$	$C = C_x \pm \delta C$	$G = G_x \pm \delta G$

### 3.4. Измерение параметров *RLC* при помощи универсального измерителя типа Е7-8

Внешний вид лицевой панели универсального измерителя Е7-8 с обозначением всех органов управления приведен на рис. 3.5. С назначением органов управления и индикаторов отсчета результатов измерения ознакомиться по техническому описанию прибора.

#### 3.4.1. Подготовка к проведению измерений

Включите тумблер СЕТЬ и дайте прибору прогреться в течение 1 минуты.

Убедитесь в правильном функционировании прибора. Проверка производится в следующем порядке:

- ♦ установите переключатели ВИД ИЗМЕРЕНИЙ в положения C, G и G, R, а тумблер ЗАПУСК - в положение СЛЕДЯЩИЙ;
- ♦ при разведенных концах соединительного кабеля на табло прибора должны появиться показания по обеим составляющим 00,00 pF или 00,01 pF и 000,0 nS;
- ♦ закоротите концы соединительного кабеля с помощью медной или латунной пластины шириной порядка 1 см и длиной 2 см, на табло прибора по обеим составляющим должны установиться показания 99,99  $\mu$ F и 999,9 mS;
- ♦ переведите переключатель C, G – L, R в положение L, R.



Рисунок 3.5 – Внешний вид лицевой панели прибора Е7-8

При замкнутых концах соединительного кабеля на табло прибора должны быть показания 000,0 или 000,1  $\mu$ H и 0,000 $\Omega$ , при разомкнутых – 999,9 H и 9,999 M $\Omega$ .

Для повышения устойчивости показаний прибора при измерениях необходимо измеряемый объект и прибор размещать вдали от источников электромагнитных полей.

### 3.4.2. Проведение измерений

#### 3.4.2.1. Присоединение измеряемых объектов:

а) при измерениях объектов двухэлектродной конструкции выводы соединительного кабеля прибора Е7-8 присоедините к выводам измеряемого объекта. Если объект измерения заключен в экран, соединенный с одним из его выводов, то этот вывод должен быть

присоединен к выводу кабеля прибора Е7-8, включенному в гнезда J, U (рис. 3.6а);

б) при измерениях проходного импеданса объектов трехэлектродной конструкции выводы кабеля соединительного прибора Е7-8 присоедините к тем зажимам объекта, импеданс между которыми следует измерить. Третий электрод присоедините к корпусному зажиму кабеля (типа крокодил) (рис. 3.6 б);

в) для присоединения объектов четырех- и пятиэлектродной конструкции используйте кабели соединительные № 3 (4.853.426), входящие в комплект прибора.

Присоедините несвязанные концы с плоскими зажимами каждого из кабелей к одноименным токовому и потенциальному выводам измеряемого объекта (например, выводы одного из кабелей соединяются с выводами J, U, второго – с J' , U'). Присоедините зажимы кабеля соединительного прибора Е7-8 к связанным выводам каждого из кабелей.

Если объект имеет пятый вывод (экран), присоедините его к корпусному зажиму соединительного кабеля прибора (рис. 3.6 в, г).

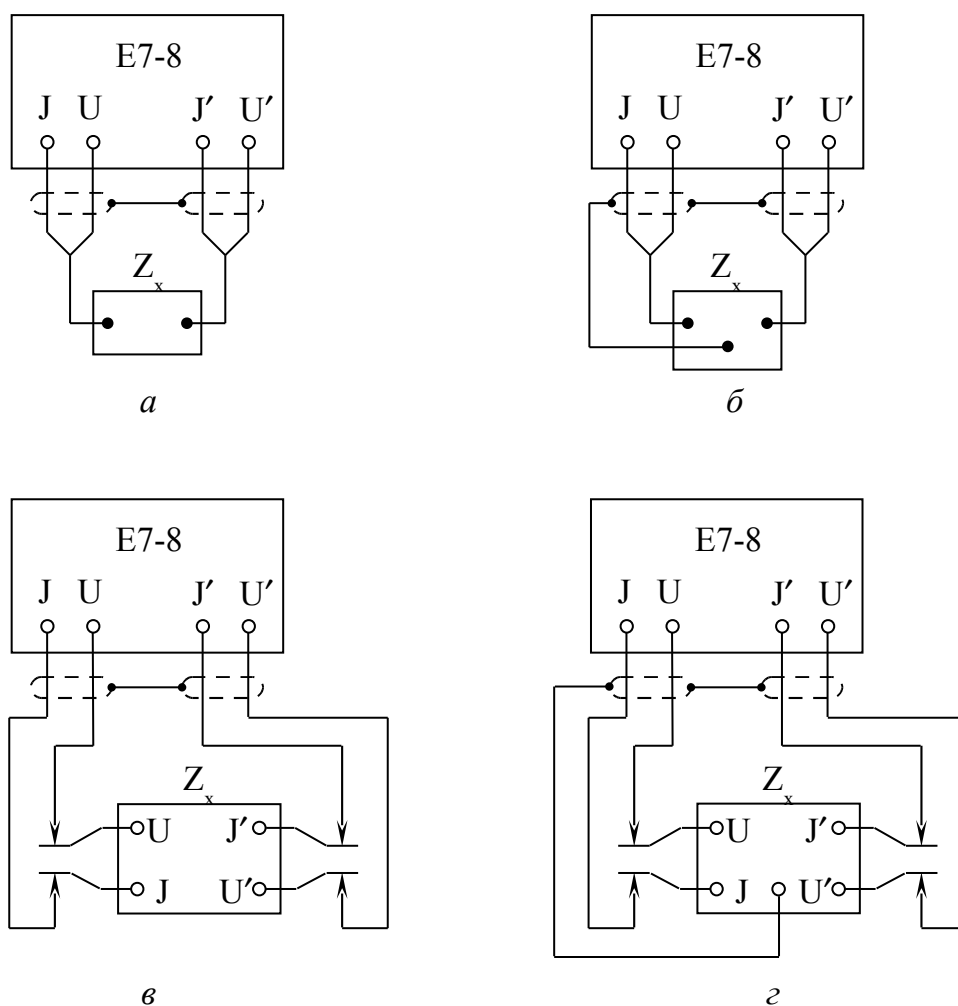


Рисунок 3.6 – Подсоединение к прибору E7-8 измеряемых объектов с 2-, 3-, 4- и 5- зажимной конструкцией выводов

3.4.2.2. Установка переключателей ВИД ИЗМЕРЕНИЯ и ЗНАК C, L при измерениях с автоматическим выбором пределов.

а) Если измерению подлежит резистор, то установите:

- переключатель ЗНАК C, L в положение АВТ;
- переключатели ВИД ИЗМЕРЕНИЯ в положения:

G, R – для переключателя G, R –  $\text{tg } \delta$ ;

C, G или L, R для переключателя C, G – L, R, в зависимости от желаемой формы результата измерения сопротивления резистора (в виде проводимости для положения C, G или сопротивления для положения L, R).

Следует также помнить, что при измерениях проводимости G реактивная составляющая будет измерена прибором в виде параллельной положительной или отрицательной емкости; при измерениях

сопротивления – в форме положительной или отрицательной индуктивности.

б) Если измерению подлежит объект с неизвестным характером реактивности, установите переключатели ВИД ИЗМЕРЕНИЯ и ЗНАК C, L в те же положения, что и по п.3.4.2.2а.

После проведения измерений и определения характера реактивности добейтесь желаемой формы результата измерения, установив переключатели ВИД ИЗМЕРЕНИЯ и ЗНАК C, L в соответствии с табл. 3.10.

Таблица 3.10 – Положения переключателей

Характер измеряемой реактивности	Желаемая форма результата измерения	Положение переключателей		
		Знак L, C	C, G - L, R	G, R - tg $\delta$
Емкость	C, G	"+" или АВТ	C, G	G, R
	C, tg $\delta$	"+"	C, G	tg $\delta$
	- L, R	"-" или АВТ	L, R	G, R
	- L, tg $\delta$	"-"	L, R	tg $\delta$
Индуктивность	L, R	"+" или АВТ	L, R	G, R
	L, tg $\delta$	"+"	L, R	tg $\delta$
	- C, G	"-" или АВТ	C, G	G, R
	- C, tg $\delta$	"-"	C, G	tg $\delta$

в) Если измерению подлежит объект с известным характером реактивности, то в зависимости от желаемой формы результатов измерения установите переключатели ВИД ИЗМЕРЕНИЯ и ЗНАК C, L в положения, соответствующие табл. 3.10.

3.4.2.3. Измерения в следящем режиме с автоматическим выбором пределов измерения.

Этот вид измерения используется тогда, когда необходимо проследить изменения параметров измеряемого объекта (например, при климатических испытаниях или при определении пределов изменения регулируемого элемента). Этот режим, однако, может быть использован и при одиночных измерениях.

Порядок проведения измерений следующий:

- установите переключатель ЗАПУСК в положение СЛЕДЯЩИЙ;

- установите переключатели ЗНАК С, L и ВИД ИЗМЕРЕНИЯ в соответствии с п.3.4.2.2;
- присоедините измеряемый объект в соответствии с п.3.4.2.1; прибор без участия оператора сразу начинает измерения, в процессе измерений на табло прибора высвечивается надпись НЕБАЛАНС;
- по окончании измерений (надпись НЕБАЛАНС гаснет) прочтите результаты измерения на табло прибора.

Примечание. При наличии внешних влияющих факторов, вызывающих нестабильность измерений, лампочки НЕБАЛАНС при балансе моста может полностью не погаснуть. При этом результат измерения следует отсчитывать как среднее арифметическое от крайних значений, высвечивающихся на табло прибора.

Если необходимо, добейтесь нужной формы результата в соответствии с указаниями п.3.4.2.2.

3.4.2.4. Измерения в режиме одиночного запуска с автоматическим выбором пределов измерения.

Режим используется для проведения измерений с ручным или внешним запуском прибора (например, при работе с устройством присоединительным 3.669.014-01).

Порядок работы следующий:

- ✓ установите переключатель ЗАПУСК в положение РУЧНОЙ;
- ✓ установите переключатели ЗНАК С, L и ВИД ИЗМЕРЕНИЯ в соответствии с п.3.4.2.2;
- ✓ присоедините измеряемый объект в соответствии с п.3.4.2.1, на табло прибора должна появиться надпись НЕБАЛАНС;
- ✓ нажмите кнопку ЗАПУСК РУЧНОЙ (при внешнем запуске прибора пуск осуществляется замыканием гнезда ВНЕШНИЙ на корпус);
- ✓ по окончании измерений (надпись НЕБАЛАНС гаснет) прочтите результаты измерения на табло прибора;
- ✓ если необходимо, добейтесь нужной формы результата в соответствии с указаниями п.3.4.2.2.

3.4.2.5. Измерения с ручным выбором пределов

Измерения с ручным выбором пределов являются режимом, обеспечивающим наибольшую сохранность прибора. Его следует применять при измерениях большого количества объектов с близкими по значению импедансами.

Если значения составляющих измеряемого импеданса известны, то перед измерениями, пользуясь табл. 3.11, где приведены значения

измеряемых величин на каждом из пределов измерения, установите переключатель ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ в нужное положение и проведите измерения в любом из режимов, описанных в пп. 3.4.2.3 и 3.4.2.4.

Таблица 3.11 – Пределы измерений

Предел	Емкость	Проводимость	Индуктивность	Сопротивление
1	$\pm 99,99$ пФ	999,9 нСм	$\pm 999,9$ Гн	9,999 МОм
2	$\pm 999,9$ пФ	9,999 мкСм	$\pm 99,99$ Гн	999,9 кОм
3	$\pm 9,999$ нФ	99,99 мкСм	$\pm 9,999$ Гн	99,99 кОм
4	$\pm 99,99$ нФ	999,9 мкСм	$\pm 999,9$ мГн	9,999 кОм
5	$\pm 999,9$ нФ	9,999 мСм	$\pm 99,99$ мГн	999,9 Ом
6	$\pm 9,999$ мкФ	99,99 мСм	$\pm 9,999$ мГн	99,99 Ом
7	$\pm 99,99$ мкФ	999,9 мСм	$\pm 999,9$ мкГн	9,999 Ом

Если измерению подлежит импеданс с неизвестными значениями составляющих, то рекомендуется следующий порядок измерений:

- установите переключатель ЗАПУСК в положение СЛЕДЯЩИЙ;
- установите переключатели ВИД ИЗМЕРЕНИИ и ЗНАК C, L в соответствии с п.3.4.2.2а;
- установите переключатель ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЙ в положение 4;
- присоедините измеряемый объект к прибору;
- если при этом на табло прибора установятся или колеблются показания 9999 хотя бы по одной из составляющих и будет гореть табло НЕБАЛАНС, то при положении переключателя C, G – L, R в C, G установите переключатель ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИИ последовательно в положения с большим номером предела до исчезновения сигнала НЕБАЛАНС при четырехзначном отсчете хотя бы по одной из составляющих; если переключатель C, G – L, R установлен в положение L, R, добейтесь тех же результатов, устанавливая переключатель ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИИ в положения с меньшим номером предела;
- если в положении 4 переключателя ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИИ на табло прибора устанавливаются или колеблются показания по обоим составляющим с нулями впереди и сигнал НЕБАЛАНС отсутствует, то при положении переключателя C, G – L, R в C, G добейтесь устойчивого четырехзначного отсчета хотя бы по одной из составляющих, устанавливая переключатель ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ



по следовательно в сторону младших пределов; если переключатель С, G – L, R установлен в положение L, R, добейтесь тех же результатов, увеличивая номер предела;

- при необходимости добейтесь нужной формы результата измерения в соответствии с п.3.4.2.2б.

### 3.5. Измерение параметров $RLC$ при помощи универсального измерителя типа Е7-12

Внешний вид лицевой панели универсального измерителя Е7-12 с обозначением всех органов управления приведен на рис. 3.7. С назначением органов управления и индикаторов отсчета результатов измерения ознакомиться по техническому описанию прибора.



Рисунок 3.7 – Внешний вид лицевой панели прибора Е7-12

#### 3.5.1. Подготовка к проведению измерений


Подключите к измерителю устройство присоединительное (Е7-12). Контактные устройства устанавливаются на устройстве присоединительном (Е7-12) путем врубания в пазы. Меняя ориентацию контактных устройств, можно менять расстояние между контактными точками.

Органы управления могут находиться в любом положении.

Поставьте переключатель СЕТЬ в верхнее положение, при этом должно загореться цифровое табло.


До проведения измерений прогрейте измеритель в течение 30 мин.

Опробуйте работу измерителя по следующим признакам.

При установке переключателя ЗАПУСК в положение  должен периодически загораться индикатор "Счет".


Произведите балансировку начальных параметров устройства присоединительного (Е7-12).

Для балансировки CG установите переключатели измерителя в следующие положения:

ЭКВ. СХЕМА	CG
ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕР.	1
ЗАПУСК	

Вращая органы подстройки CG, добейтесь нулевых показаний измерителя по обоим составляющим.

Для балансировки LR установите переключатели измерителя в следующие положения:

ЭКВ. СХЕМА	LR
ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕР.	5
ЗАПУСК	

Замкните устройство присоединительное Е7-12 перемычкой 7.775.886. Вращая органы подстройки LR, добейтесь показаний измерителя, указанных на перемычке. На перемычке даны три группы начальных параметров, соответствующих ближнему, среднему и дальнему расположению контактных точек устройства присоединительного Е7-12.

### 3.5.2. Проведение измерений

3.5.2.1. Для того чтобы произвести измерение объекта, его нужно подключить к устройству присоединительному Е7-12.



После подключения объекта установите переключатель ЭКВ. СХЕМА в желаемое положение. В положении CG измеряемый объект представляется в виде параллельного соединения емкости и проводимости, в положении CD – в виде емкости и тангенса угла потерь, в положении LR – в виде последовательного соединения индуктивности и сопротивления, в положении LD – в виде индуктивности и тангенса угла потерь. Знак тангенса угла потерь совпадает со знаком активной составляющей импеданса измеряемого объекта, то есть  $D = G/|\omega C|$  или  $D = R/|\omega L|$ .


Установите нужный предел измерения, если ориентировочно известно значение импеданса измеряемой величины. Если измеряется объект, параметры которого совершенно неизвестны, установите переключатель ПРЕДЕЛ ИЗМЕР. в положение. АВТ.

Установите переключатель УРОВЕНЬ СИГНАЛА в нужное положение. Для подачи смещения подключите к разъему СМЕЩЕНИЕ

ВНУТР. на задней панели пульт смещения и установите на нем величину и вид смещения (напряжение или ток). Внутренний источник смещения может выдать положительное напряжение в пределах 0–40 В или ток в пределах 0–40 мА. При необходимости подачи напряжения смещения свыше 40 В к клеммам СМЕЩЕНИЕ ВНУТР. подключите источник постоянного тока с необходимым напряжением. Вольтметр, контролирующий напряжение смещения, можно подключить к клеммам КОНТРОЛЬ. Подаваемое смещение прикладывается к зажимам I, U, зажимы I',U' по постоянному току заземлены. При закорачивании измеряемого объекта ток через него не превышает 10 мА при подаче на объект напряжения смещения от внутреннего или внешнего источника. При разрыве измеряемого объекта напряжение на нем не превышает 5 В при подаче на объект тока смещения.

При работе с прибором без подачи смещения внешний источник и пульт смещения отсоедините от прибора, а тумблер СМЕЩЕНИЕ поставьте в положение ВНЕШ.

Установите переключатель ЗАПУСК в нужное положение. В положении  прибор запускается при нажатии кнопки ЗАПУСК, в положении  прибор запускается непрерывно и таким образом осуществляет следящий режим измерения.

Нажмите кнопку ПУСК, если переключатель ЗАПУСК находится в положении , после чего на табло появятся результаты измерения.

В случае, если измеряемый объект не может быть измерен при выбранном положении органов управления, например, если подключена емкость свыше 200 нФ в режиме CG или CD, или сопротивление свыше 20 кОм в режиме LR или LD и т.д. около переключателей ЭКВ. СХЕМА и ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕР. загораются светодиодные индикаторы, указывающие оператору, в какое положение надо перевести переключатели, чтобы измерение данного объекта можно было произвести.

Светодиод, расположенный слева от переключателя ЭКВ. СХЕМА, показывает, что нужно установить режим CG, справа – режим LR. Указатели, расположенные слева и справа от переключателя ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕР., показывают, что необходимо переключать движок переключателя пределов в сторону 1-го или 5-го пределов.

При необходимости измерения можно производить и не на том пределе, который указывают указатели предела. Важно, чтобы показания прибора ни по одному из параметров не были равны 20.000 ед. счета.

3.5.2.2. При измерении низкоомных объектов с устройством присоединительным Е7-12 следует учитывать дополнительную погрешность измерения, вызванную погрешностью определения  $R_0$  и  $L_0$  собственных сопротивления и индуктивности перемычки 7.555.886. Величина  $R_0$  не превышает 1 мОм, величина  $L_0$  не превышает 1 нГ.

Схема включения остаточных параметров, вызывающих дополнительную погрешность измерения, приведена на рис. 3.8.

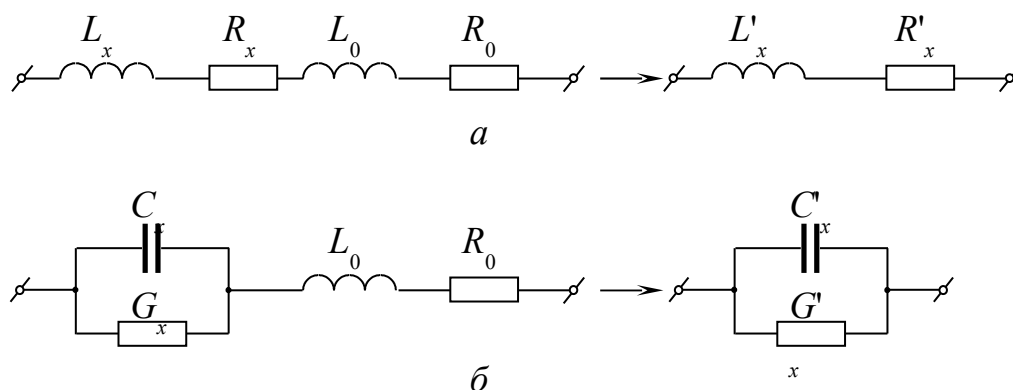


Рис. 3.8 – Схема включения остаточных параметров:

а) для режима LR; б) для режима CG

Эквивалентные измеряемые прибором величины  $L'_x$ ,  $R'_x$ ,  $C'_x$ ,  $G'_x$ , определяются выражениями:

$$L'_x = L_x + L_0; \quad (3.1)$$

$$R'_x = R_x + R_0; \quad (3.2)$$

$$C'_x = C_x (1 + \omega^2 L_0 C_x - 2R_0 G_x - L_0 G_x^2 / C_x); \quad (3.3)$$

$$G'_x = G_x (1 + 2\omega^2 L_0 C_x - R_0 G_x + \omega^2 R_0 C_x^2 / G_x); \quad (3.4)$$

3.5.2.3. При измерении трехзажимных объектов (рис. 3.9) третий электрод подключите к корпусной клемме устройства присоединительного Е7-12. При этом прибор измерит только проходной импеданс ( $z_{12}$ ).

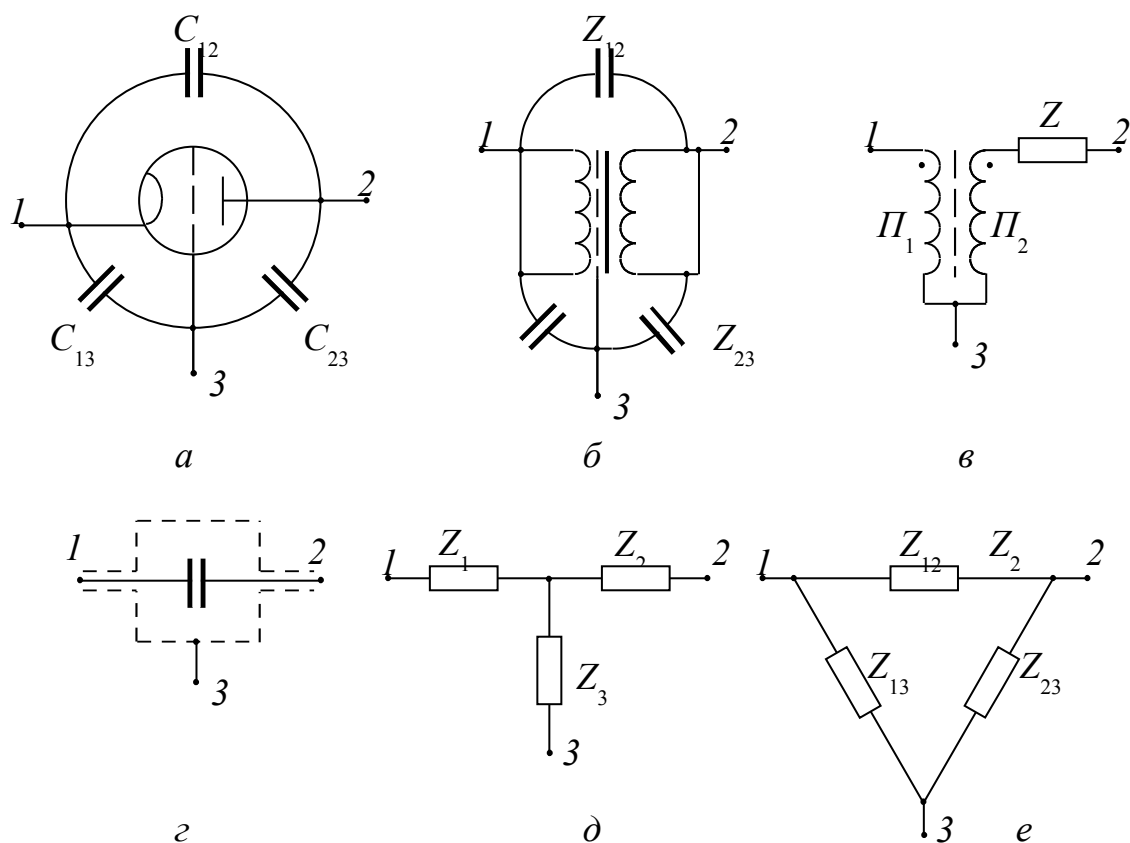


Рисунок 3.9 – Примеры трехзажимных объектов:

- а) емкость анод-катод лампы при заземленной сетке;
- б) остаточная емкость между экранированными обмотками трансформатора;
- в) импеданс, включенный через трансформатор (может использоваться при измерении коэффициента трансформации и фазировки обмоток);
- г) емкость экранированного конденсатора;
- д) звездообразная цепь;
- е) эквивалентная схема трехзажимного объекта.

Частичные импедансы  $z_{13}$  и  $z_{23}$  слабо влияют на погрешность измерения. В табл. 3.12 приведены значения частичных импедансов, вызывающих дополнительную погрешность измерения не более основной.

Таблица 3.12 – Значения шунтирующих импедансов

Предел измерения	Шунтирующий импеданс со стороны $I, U$	Шунтирующий импеданс со стороны $I', U'$
1	2 кОм	2 кОм

2	500 Ом	1 кОм
3	500 Ом	500 Ом
4	100 Ом	500 Ом
5	50 Ом	500 Ом

3.5.2.4. Перед измерением четырехпарных объектов установите начальный баланс прибора по CG, L и R с помощью калибратора нуля.

Для установки нуля по CG подключите клеммы XX, калибратора нуля, установите режим CG, 1-й предел измерения и добейтесь нулевых показаний прибора, вращая органы начального баланса по CG.

Для установки нуля по LR подключите клеммы KЗ, установите режим LR, 5-й предел и добейтесь нулевых показаний прибора, вращая органы начального баланса по LR. После этого отключите калибратор нуля, подключите измеряемый объект согласно маркировке кабелей соединительных ВЧ и произведите измерение, как указано в п. 3.5.2.1.

3.5.2.5. Образцовые меры емкости E1-3 измеряются с устройством присоединительным E1-3 №1, подключаемым к прибору через кабели соединительные ВЧ. Перед измерением мер также проведите компенсации начальных параметров прибора и устройства присоединительного E1-3 №1.

Для установки нуля по CG подключите к устройству присоединительному E1-3 №1 колпачок (входит в состав мер E1-3), установите режим CG, 1-й предел и, вращая органы установки начального баланса по CG, добейтесь нулевых показаний прибора.

Для установки нуля по LR к устройству присоединительному E1-3 №1 подключите замыкатель через контакт (входят в состав мер E1-3), установите режим LR, 5-й предел и, вращая органы начального баланса по LR, добейтесь нулевых показаний прибора. По окончании балансировки начального баланса снимите замыкатель, подключите к устройству присоединительному E1-3 №1 образцовую меру и произведите измерение, как указано в п. 3.5.2.1.

С устройством присоединительным E1-3 №1 подобным образом могут быть измерены и другие объекты с аналогичной конструкцией разъема.

3.5.2.6. Прибор может использоваться в качестве компаратора мер иммитанса на частоте 1 МГц. Работа с прибором в этом случае зависит от конструктивных особенностей компарируемых мер и от требуемой погрешности компарирования.

Наиболее существенную часть погрешности компарирования составляет единица дискретности (ед. счета).

В приборе предусмотрена возможность устранения погрешности компарирования, вызванной дискретностью отсчета, путем создания искусственной нестабильности ("размытия" единицы счета), осуществления многократных измерений и последующих вычислений средних значений полученных результатов измерения. Для этого на задней панели прибора установлен разъем МОДУЛ. для подключения модулирующих воздействий. Чувствительность по входу МОДУЛ. составляет 1В на ед.счета.

В качестве источника модулирующих воздействий может быть использован собственный источник смещения прибора, выход которого также имеется на задней панели прибора, либо внешний модулятор, например, генератор шума Г2-37 или программируемый источник напряжения.

### 3.6. Практическая работа с мостом переменного тока Р5058

Внешний вид с обозначением элементов управления и индикации приборов Р5058 приведен на рис. 3.10. С назначением элементов управления и индикаторами, а также особенностями работы и эксплуатации приборов, ознакомиться по техническому описанию, которое находится на рабочем месте.




Рисунок 3.10 – Внешний вид лицевой панели прибора Р5058

#### 3.6.1. Подготовка к работе

3.6.1.1. Для работы с мостом, прежде всего, нажмите кнопку "РУЧН" переключателя "ЗАПУСК" и установите нажатием соответствующей кнопки переключателя "ИЗМЕРЕНИЕ" требуемый режим измерения. При измерении процентных отклонений, кроме соответствующих кнопок режима измерения необходимо нажать кнопку "%".

Установите нажатием соответствующей кнопки переключателя "ЧАСТОТА" требуемую рабочую частоту и установите в среднее положение ручку "ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ". Запуск моста производите нажатием кнопки "СТАРТ".

Для работы моста с автоматическим запуском после выполнения требований по п. 3.6.1.1 нажмите кнопку "АВТОМ" переключателя "ЗАПУСК" и установите ручкой "ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ" требуемое время индикации.

Для работы моста с внешним запуском после выполнения требований по п. 3.6.1.1 нажмите кнопку "ВНЕШН" и посредством кабеля через розетку "  " подсоедините к мосту источник сигналов внешнего запуска.

3.6.1.2 Для работы моста с внешним управлением нажмите кнопки "УПРАВЛЕНИЕ ВНЕШНЕЕ" и подсоедините к мосту через розетку X2 источник сигналов внешнего управления.

3.6.1.3. Установите ручку "КОМПЕНСАЦИЯ Сп" в крайнее положение, вращая ее против часовой стрелки до щелчка.

3.6.1.4. Подсоедините к мосту объект измерения. Выбор схемы под соединения и, следовательно, соответствующего кабеля производите, пользуясь примечанием 4 (см. п. 2.2 технического описания прибора).

На рис. 3.11 *а, б* показаны соответственно двух- и трехзажимная схемы подсоединения объектов измерения. При использовании двухзажимной схемы подсоединения (см. рис. 3.11*а*) не допускается касание корпуса (экрана) измеряемого объекта к корпусу моста и другим "заземленным" объектам.

На рис. 3.11 *в, г* показаны соответственно четырех- и пятизажимная схемы подсоединения объектов измерения.

При измерении параметров объектов с малым сопротивлением рекомендуется использовать соединительный кабель с фиксируемой конфигурацией. Схема подсоединения объекта измерения для этого случая приведена на рис. 3.12.



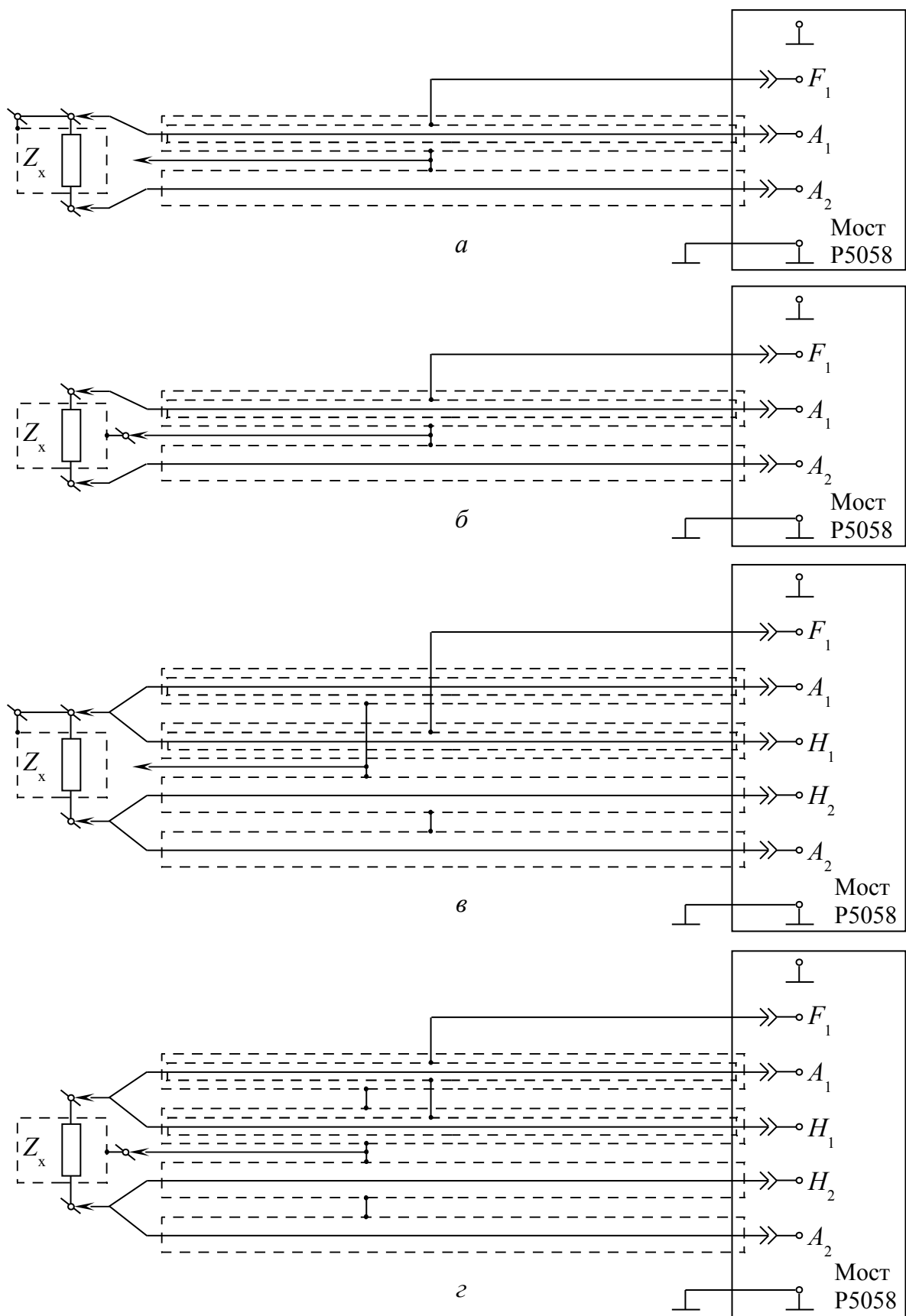


Рисунок 3.11 – Схемы подключения к мосту объекта измерения:  
 а – двухзажимная, в – четырехзажимная,  
 б – трехзажимная, г – пятизажимная.

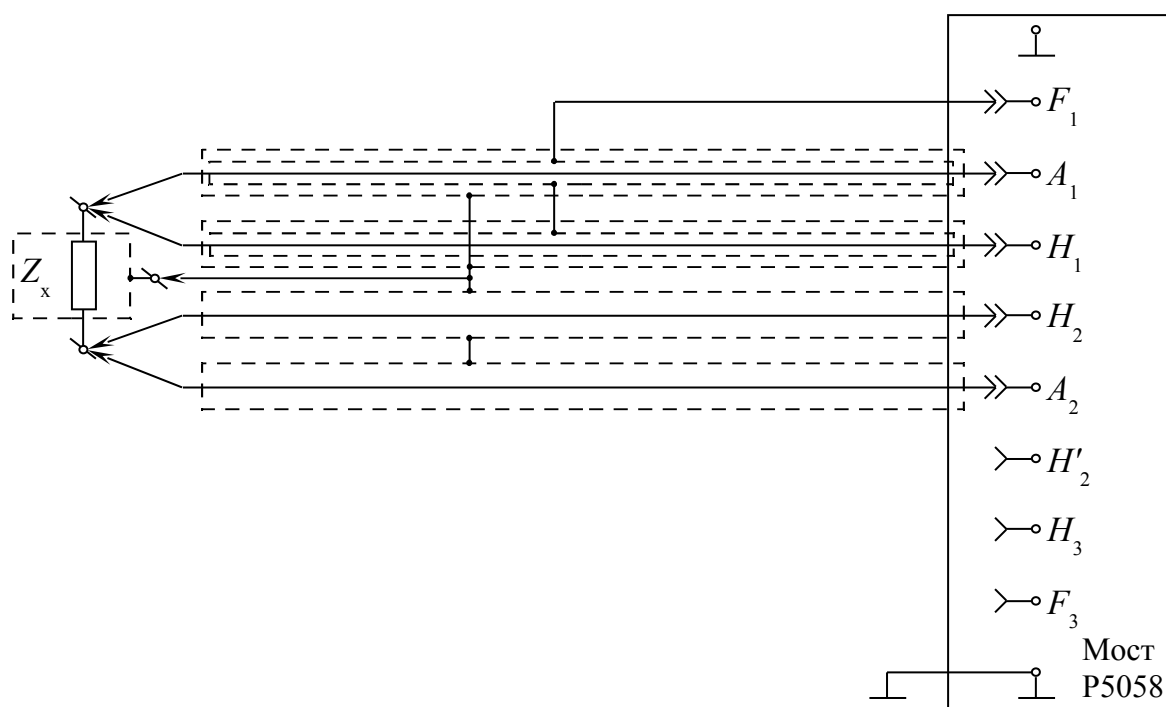


Рисунок 3.12 – Схема пятизажимного подсоединения к мосту объекта измерения с малым сопротивлением

При подсоединении объекта измерения к мосту с помощью вспомогательных соединительных устройств учтите, что сопротивление линий связи зажимов объекта с разъемами "H<sub>1</sub>" и "H<sub>2</sub>" моста не должно превышать 0,05; сопротивление линий связи зажимов объекта с разъемами "A<sub>1</sub>" и "A<sub>2</sub>" не должно превышать 10 Ом.

Подсоединяйте к разъему "A<sub>1</sub>" зажим объекта измерения, имеющий меньшую емкость относительно его корпуса (экрана).

При измерении процентных отклонений для подсоединения объекта измерения и объекта, принимаемого за образцовый, могут быть использованы двух- и трехзажимная схемы подсоединения. На рис. 3.13, для примера, приведена трехзажимная схема подсоединения. При измерении дифференциальных конденсаторов или резисторов общую точку подсоединяйте к разъему "A<sub>2</sub>".

3.6.1.5. При подсоединении объекта измерения по двух- и трехзажимной схеме нажмите кнопку "ВКЛЮЧЕНИЕ ДВУХЗАЖИМНОЕ".

3.6.1.6. Установите переключатель напряжения питания в положение, соответствующее напряжению в сети электропитания.

Проверьте наличие и целостность предохранителя в цепи питания моста.

Убедитесь в том, что тумблер "СЕТЬ" выключен. Вставьте вилку кабеля электропитания моста в розетку.

Включите тумблер "СЕТЬ". Через 1 мин. мост будет готов к работе.

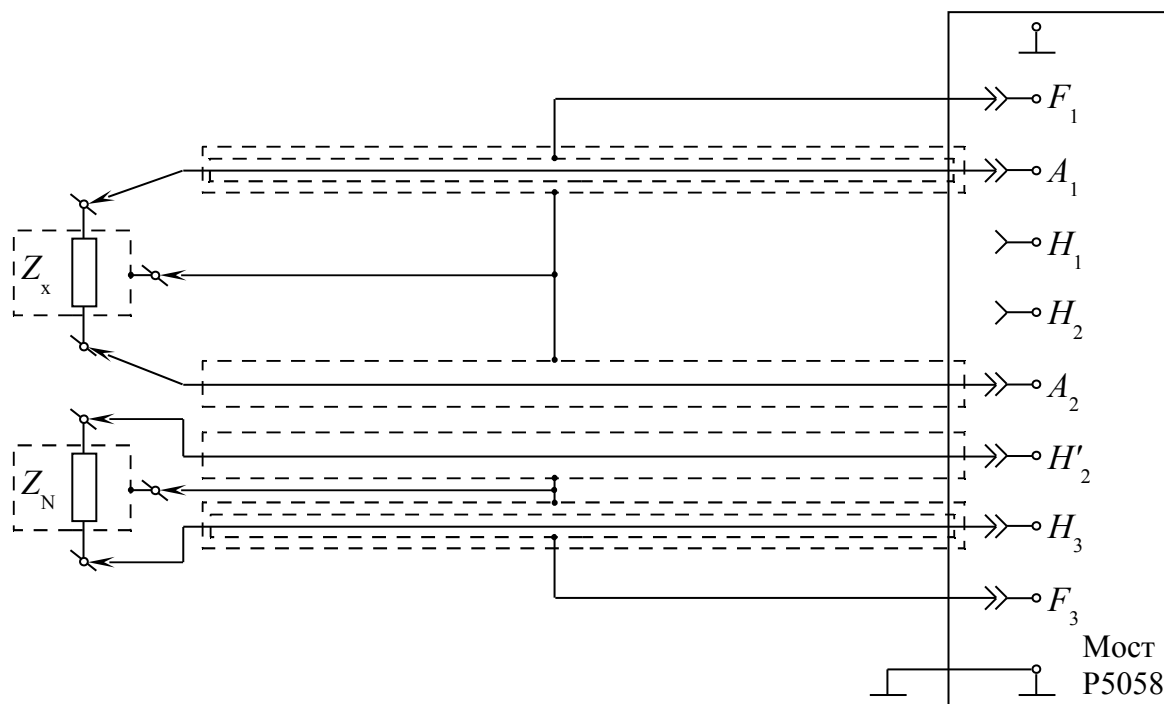


Рисунок 3.13 – Схема трехзажимного подсоединения объекта измерения и объекта, принимаемого за образцовый, при измерении процентных отклонений

### 3.6.2. Порядок работы

3.6.2.1. Если мост работает с ручным запуском, нажмите кнопку "СТАРТ" и произведите отсчет результата измерения.

3.6.2.2. Если мост работает с автоматическим запуском, при необходимости, отрегулируйте время индикации отсчета. Для этого вращайте рукоятку "ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ" по часовой стрелке – это будет приводить к увеличению времени индикации. Если поставить рукоятку "ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ" в крайнее положение, вращая ее против часовой стрелки до щелчка, то время индикации, практически, будет равно нулю.

3.6.2.3. Если мост работает с внешним запуском, включите источник сигнала внешнего запуска.

3.6.2.4. Если мост работает с внешним управлением, включите источник сигналов внешнего управления.

3.6.2.5. Если требуется регистрировать результаты измерения, подсоедините к мосту, предварительно выключив его, через разъемы X3 и X4 устройство регистрации. Рекомендуется использовать транскриптор Ф5033К, обязательно ознакомьтесь с описанием и инструкцией по эксплуатации устройства регистрации.

3.6.2.6. Для получения более точного значения измеряемых параметров в полученный отчет результата измерения рекомендуется ввести поправку, необходимость которой обусловлена влиянием на результат измерения начальных параметров моста и кабеля подсоединения:  $C_{нач}$ ,  $L_{нач}$ ,  $R_{нач}$ , а также паразитной емкости  $C_{п}$  между зажимом объекта измерения, подсоединенного к выводу  $A_1$ , и корпусом (экраном) объекта измерения, подсоединенного к корпусу моста. При подсоединении объекта измерения по двух- и четырехзажимной схемам поправку в результат измерения от влияния  $C_{п}$  не вводите.

При массовой проверке однотипных объектов измерения влияние  $C_{п}$  можно компенсировать с помощью рукоятки "КОМПЕНСАЦИЯ  $C_{п}$ ". Для этого, например, подсоедините к мосту образцовую меру емкости с известным значением  $\text{tg } \delta$  и с емкостью  $C_{п} < 30 \text{ пФ}$ . Подсоедините между выводом  $A_1$  и корпусом моста, дополнительный конденсатор, величина емкости которого равна  $C_{п}$  объекта измерения. Вращая рукоятку "КОМПЕНСАЦИЯ  $C_{п}$ " добейтесь требуемого отсчета по  $\text{tg } \delta$ . После этого переходите к измерениям параметров объекта измерения, предварительно отсоединив дополнительный конденсатор и образцовую меру емкости. Поправку в результат измерения от влияния  $C_{п}$  при этом не вводите.

Значения  $C_{нач}$ ,  $L_{нач}$ ,  $R_{нач}$ , и  $C_{п}$  можно измерить с помощью моста.  $C_{нач}$  измеряйте в режиме  $\text{tg } \delta$  при отсоединенном объекте измерения.  $L_{нач}$  и  $R_{нач}$  измеряйте в режимах  $L_x, R$  и  $R_{Lx}, L$  при короткозамкнутых зажимах объекта измерения,  $C_{п}$  измеряйте в режимах  $C_x, \text{tg } \delta$  подсоединив зажим объекта измерения, для которого требуется определить емкость  $C_{п}$ , к выводу  $A_1$ ; корпус (экран) объекта измерения – в выводу  $A_2$  моста. Второй зажим объекта измерения подсоедините к корпусу моста, если емкость (сопротивление) объекта измерения не превышает 0,1 мкФ (20 кОм). В противном случае второй зажим объекта измерения к корпусу моста не подсоединяйте. При этом полученное значение  $C_{п}$  надо разделить на два.

Значения поправок вычисляйте по формулам, приведенным в табл. 2 технического описания прибора. Учтите, что в табл. 2 приняты следующие размерности единиц измерения: для  $C_{п}$  и  $C_{нач}$  – пФ; для  $C_x$  и  $C$  – мкФ; для  $L_{нач}$  – мкГн; для  $R_{нач}$ ,  $R_{Lx}$ ,  $R_{Cx}$  и  $R$  – Ом; для  $G_x$  и  $G$  – См; для  $L_x$  и  $L$  – Гн; для  $\tau$  – мкс; для  $f$  – кГц. Если, например, получен отсчет результата измерения емкости  $C_x$  в нФ, преобразуйте нФ в мкФ; в вычисленную поправку вводите в значение  $C_x$ , выраженное в мкФ.

Для увеличения точности при измерении процентных отклонений рекомендуется влияние  $C_{нач}$  компенсировать подсоединением параллельно

$Z_x$  (или  $Z_N$ ) дополнительной емкости  $C_{\text{доп}} = C_{\text{нач}}$ , а влияние  $R_{\text{нач}}$  – включением последовательно с  $Z_x$  (или  $Z_N$ ) дополнительного резистора  $R_{\text{доп}} = R_{\text{нач}}$ .

3.6.2.7. Отсчет по  $\text{tg } \delta$  при измерениях  $C < 100$  мкФ в режиме  $C_x$ ,  $\text{tg } \delta$  на частоте 50 Гц делите на два.

### 3.7. Практическая работа с мостом переменного тока P5016

Внешний вид с обозначением элементов управления и индикации приборов P5016 приведен на рис. 3.14. С назначением элементов управления и индикаторами, а также особенностями работы и эксплуатации приборов, ознакомиться по техническому описанию, которое находится на рабочем месте.

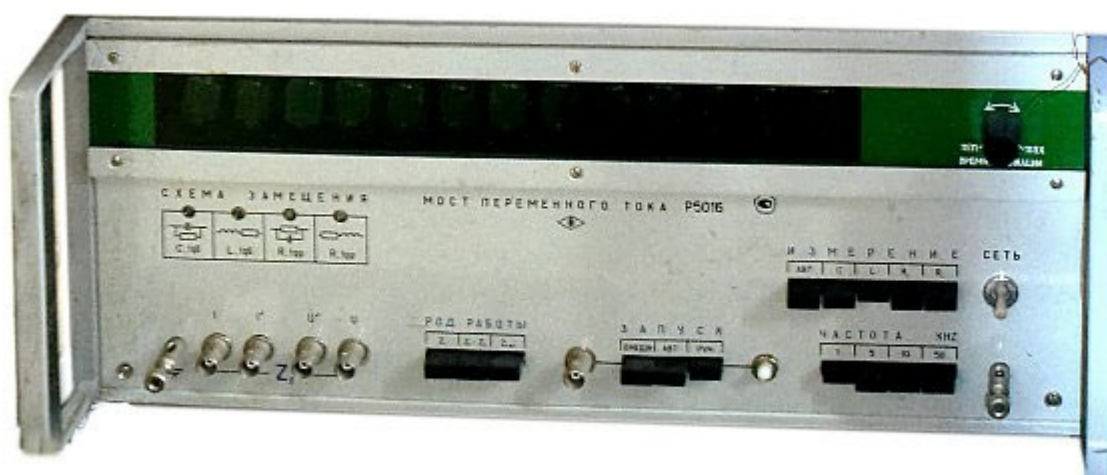


Рисунок 3.14 – Внешний вид лицевой панели прибора P5016

#### 3.7.1. Подготовка к работе

Вставьте вилку сетевого шнура моста в розетку сети, предварительно убедившись, что мост выключен.

Подключите к мосту объект измерения, используя прилагаемые к мосту кабели подсоединения измеряемого объекта. Если сопротивление измеряемого объекта меньше 1000 Ом, пользуйтесь кабелем, оканчивающимся четырьмя отдельно экранированными выводами.

Установите переключателем "Частота, кГц" требуемую рабочую частоту.

Установите переключатели "РОД РАБОТЫ" и "ЗАПУСК" в положения "Z1" и "РУЧН" соответственно.

Установите переключатель "ИЗМЕРЕНИЕ" в один из режимов "С", "L", "R<sub>C</sub>", "R<sub>L</sub>" в соответствии с характером измеряемого сопротивления.

Примечание. Если переключатель "ИЗМЕРЕНИЕ" находится в положении " АВТОМ", характер измеряемого сопротивления выбирается автоматически за исключением случаев, когда измеряемый параметр (L, C, R) соответствует крайним поддиапазнам измерения либо индуктивная составляющая при измерении активного сопротивления такова, что  $\text{tg } \varphi < 0,1$ .

### *3.7.2 Порядок работы*

Нажмите кнопку "СЕТЬ".

Нажмите кнопку ручного запуска прибора.

После уравнивания моста (отсутствуют вариации цифр в любом из десятичных разрядов) установите переключатели "РОД РАБОТЫ" и "ЗАПУСК" в положения, наиболее удобные для проводимых измерений (см. п.п. 2.12 и 2.13 технического описания).

Отсчет результата измерения производите по окончанию вариаций цифр в любом из десятичных разрядов (допускается вариация 3–4 единицы младших разрядов в режиме "L").

Примечание. В режиме слежения или повторных измерений (переключатель " РОД РАБОТЫ" в положении "Z<sub>var</sub>" или "Z<sub>1</sub>– Z<sub>n</sub>") скачкообразное изменение величины измеряемого параметра (L, C, R) не должно превышать 5 единиц дискретности старшего разряда.

Смену объекта измерения производите после окончания процесса уравнивания при установленных переключателем "РОД РАБОТЫ" режимах "Z<sub>1</sub>" либо "Z<sub>1</sub>–Z<sub>n</sub>" и ручном запуске прибора (для исключения запуска прибора при не подсоединенном объекте измерения).

Если при измерения активных сопротивлений (переключатель "ИЗМЕРЕНИЕ" режиме "R<sub>L</sub>" или "R<sub>C</sub>" и переключатель "ЗАПУСК" в положение "АВТОМ"), автоматический запуск прибора отсутствует, отсутствует и сигнал "Конец измерения", необходимый для запуска цифropечати, переведите переключатель "ИЗМЕРЕНИЕ" из положения "R<sub>C</sub>" в положение "R<sub>L</sub>" либо наоборот.

При отсутствии устойчивого отсчета, на цифровом табло по истечении 5 с после запуска прибора, установите переключатели "РОД РАБОТЫ" и "ЗАПУСК" в положение "Z<sub>1</sub>" и "РУЧН" соответственно и нажмите кнопку ручного запуска. После уравнивания моста установите прежние положения переключателей "РОД РАБОТЫ" и " ЗАПУСК"

При переключении частоты с 1 на 5, 10, 50 кГц (либо наоборот выдержка времени, предшествующая запуску прибора должна быть не менее 2с.

### 3.8. Практическая работа с измерителем добротности BM560

Внешний вид лицевой панели измерителя добротности BM560 с обозначением всех органов управления приведен на рис. 3.15. С назначением органов управления и индикаторов отсчета результатов измерения ознакомиться по техническому описанию прибора.



Рисунок 3.15 – Внешний вид лицевой панели прибора BM560


#### 3.8.1. Подготовка к работе

3.8.1.1. Для подготовки измерителя добротности к измерениям поставьте ручки управления в исходное положение:

- ♦ переключатель рода измерений Q– $\Delta Q$  в положение Q;
- ♦ переключатель ВНУТРЕННИЙ ВОЛЬТМЕТР – ОТКЛ. в положение ВНУТРЕННИЙ ВОЛЬТМЕТР;
- ♦ подключить шнур питания к прибору;
- ♦ включите вилку шнура питания в сеть;
- ♦ поставьте тумблер питания в положение ~, при этом должна загореться сигнальная лампа. После 15 минутного прогрева измеритель добротности готов к работе.

3.8.1.2. Проведите контроль измерителя добротности на функционирование, для чего:

- переключатель ЧАСТОТА установите на первом поддиапазоне;
- поставьте переключатель ПРЕДЕЛЫ Q в положение 300;

- нажмите кнопку КАЛИБРОВКА Q▽;
- ручкой КАЛИБРОВКА Q проверьте запас установки калибровки (после знака ▽) по шкале измерительного прибора;
- проверьте запас установки калибровки на всех под диапазонах генератора;
- переключатель Q - ΔQ установите в положение ΔQ;
- ручками НУЛЬ ΔQ и КАЛИБРОВКА Q▽ проверьте возможность установки нуля по шкале измерительного прибора;
- отпустите кнопку КАЛИБРОВКА Q▽;
- нажмите кнопку (  ) и проверьте вращение шкалы измерительного конденсатора.

3.8.1.3. Проведите калибровку измерителя добротности, для чего:


- установите переключатель ЧАСТОТА на требуемый поддиапазон частоты;
- установите ручкой ЧАСТОТА требуемую частоту;
- установите переключатель Q - ΔQ в положение Q;
- нажмите кнопку КАЛИБРОВКА Q▽;
- установите ручкой КАЛИБРОВКА Q▽ стрелку измерительного прибора точно на риску под знаком ▽;
- отпустите кнопку КАЛИБРОВКА QV.

Измеритель добротности готов к измерениям.

### 3.8.2. Порядок работы

3.8.2.1. Метод непосредственного измерения добротности и напряжения

Измерение производите следующим образом:

- подключите измеряемый объект (например: катушку индуктивности) к клеммам L<sub>x</sub>;
- поставьте переключатель ПРЕДЕЛЫ Q в положение соответствующее предполагаемому значению добротности измеряемого объекта;
- произведите калибровку измерителя добротности (см. п. 3.8.1.3);
- настройте контур в резонанс. Грубая настройка в резонанс осуществляется нажатием кнопки включения электрического привода ротора измерительного конденсатора (  ). Точная настройка

производится ручкой ЕМКОСТЬ пФ. Момент настройки измеряемого объекта в резонанс соответствует максимальному показанию стрелки измерительного прибора.



Если стрелка измерительного прибора находится в пределе 1/3 шкалы, то перейдите на более чувствительную шкалу переключателем ПРЕДЕЛЫ Q.

После точной настройки контура в резонанс нажмите кнопку КАЛИБРОВКА  $Q \nabla$  и ручкой КАЛИБРОВКА  $Q \nabla$  установите стрелку измерительного прибора точно на риску, обозначенную знаком  $\nabla$ , после чего отпустите кнопку КАЛИБРОВКА  $Q \nabla$ ;

- отсчитайте добротность Q по соответствующей шкале измерительного прибора;
- отсчитайте напряжение на измеряемом объекте по нижней шкале измерительного прибора.

При повышенных требованиях к точности измерений рекомендуется перед снятием показаний проверить точность настройки контура в резонанс и при необходимости подстроить его. Отсчет добротности для положения переключателя ПРЕДЕЛЫ Q 300 и 1000 производится по шкалам соответственно 30 и 100 с последующим умножением показаний на 10.

#### 3.8.2.2. Измерение добротности методом расстройки контура по емкости

Этот метод состоит в измерении полосы пропускания контура и использует зависимость добротности контура от его полосы пропускания. Измерение произведите следующим образом:

- ✓ подключите измеряемый объект к клеммам  $L_x$ ;
- ✓ произведите калибровку измерителя добротности;
- ✓ настройте контур в резонанс и произведите отсчет добротности Q по шкале измерительного прибора и емкости C по шкале ЕМКОСТЬ pF;
- ✓ расстройте контур ручкой ЕМКОСТЬ pF, уменьшив показание измерительного прибора до уровня 0,707 от значения измеренной добротности. Эту операцию сделайте дважды: при расстройке в сторону как малых, так и больших емкостей и отметьте значения  $C_1$  и  $C_2$ .

Одновременно нужно всегда проверять калибровку и в случае надобности подстроить.

Добротность измеряемого объекта определяется по формуле

$$Q = \frac{2C}{C_2 - C_1} \quad (3.5)$$

### 3.8.2.3. Измерение разности величин добротности

Шкала  $\Delta Q$  служит для непосредственного отсчета разности величин добротности в пределах  $0 \pm 30$  ед. при установке переключателя ПРЕДЕЛЫ Q в положение 300 или 1000.

Для отсчета по шкале  $\Delta Q$ :

- ♦ подключите измеряемый объект к клеммам  $L_x$ ;
- ♦ произведите калибровку измерителя добротности и измерение добротности измеряемого объекта согласно п. 3.8.2.1;
- ♦ установите переключатель Q- $\Delta Q$  в положение  $\Delta Q$ ;
- ♦ установите нуль по шкале  $\Delta Q$  ручкой НУЛЬ  $\Delta Q$ ;
- ♦ замените измеряемый объект другим, отличающимся от первого по добротности на величину не более 30 ед. (добротность второго измеряемого объекта измерена согласно п. 3.8.2.1.);
- ♦ произведите отсчет разности величин добротности по шкале  $\Delta Q$  (точный отсчет).

Примечание. На шкалах 30 и 100 отсчет разности величин добротности производится непосредственно по этим шкалам.

### 3.8.2.4. Измерение собственной емкости катушек индуктивности

*Аналитический метод определения собственной емкости катушек индуктивности  $C_0$ .*

Измерения произведите следующим образом:

- присоедините катушку к клеммам  $L_x$ ;
- установите переключатель Q- $\Delta Q$  в положение Q;
- установите переключатель ПРЕДЕЛЫ Q в положение 1000;
- установите переключатель ЧАСТОТА на любой поддиапазон;
- нажмите кнопку КАЛИБРОВКА Q $\nabla$ ;
- произведите калибровку измерительного прибора ручкой КАЛИБРОВКА Q $\nabla$ ;
- отпустите кнопку КАЛИБРОВКА Q $\nabla$ ;
- установите ручкой ЕМКОСТЬ pF по шкале емкости измерительного конденсатора емкость вблизи максимальных значений;
- отметьте значение емкости  $C_1$ ;
- настройте контур в резонанс ручкой ЧАСТОТА, определив нужный поддиапазон переключателем ЧАСТОТА;
- отметьте частоту резонанса –  $f_1$ ;
- установите ручкой ЧАСТОТА частоту  $f_2 = 2f_1$ ;
- откалибруйте измерительный прибор;
- настройте контур в резонанс ручкой ЕМКОСТЬ pF;

- отметьте значение емкости  $C_2$  по шкале емкости измерительного конденсатора.

Собственная емкость катушки индуктивности  $C_0$  определяется по формуле:

$$C_0 = \frac{C_1 - 4C_2}{3} \quad (3.6)$$

Примечание.

В общем случае, пренебрегая погрешностью установки частоты  $f_2$ , если  $f_2 = \alpha f_1$  и при условии, что  $\alpha > 1$  справедливо выражение:

$$C_0 = \frac{C_1 - \alpha^2 C_2}{\alpha^2 - 1} \quad (3.7)$$

Для случая  $\alpha = \sqrt{2}$  это выражение упрощается и сводится к виду:

$$C_0 = C_1 - 2C_2 \quad (3.8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, показывающий во сколько раз  $f_2$  отличается от  $f_1$ .

*Графический метод определения собственной емкости катушек*

Выражение  $L\omega^2(C + C_0) = 1$  можно представить прямой на плоскости, если принять  $C$  за независимую, а  $1/f^2$  за зависимую переменную, то

$$\frac{1}{f^2} = (2\pi)^2 LC + (2\pi)^2 LC_0 \quad (3.9)$$

При  $1/f^2 = 0$  получаем  $C = -C_0$ .

Измеряемая катушка подключается к клеммам  $L_x$ . Для нескольких значений емкости  $C$  по шкале измерительного конденсатора производится измерение резонансной частоты и по этим значениям строится график функции (см. рис. 3.16).

$$\frac{1}{f^2} = F(C) \quad (3.10)$$

Прямую, построенную по подученным точкам, можно продолжить до пересечения с осью  $C$ . Отрицательный отрезок на оси  $C$  между точкой

пересечения указанной прямой с осью  $C$  и началом координат, соответствует значению собственной емкости  $C_0$  измеряемой катушки индуктивности.

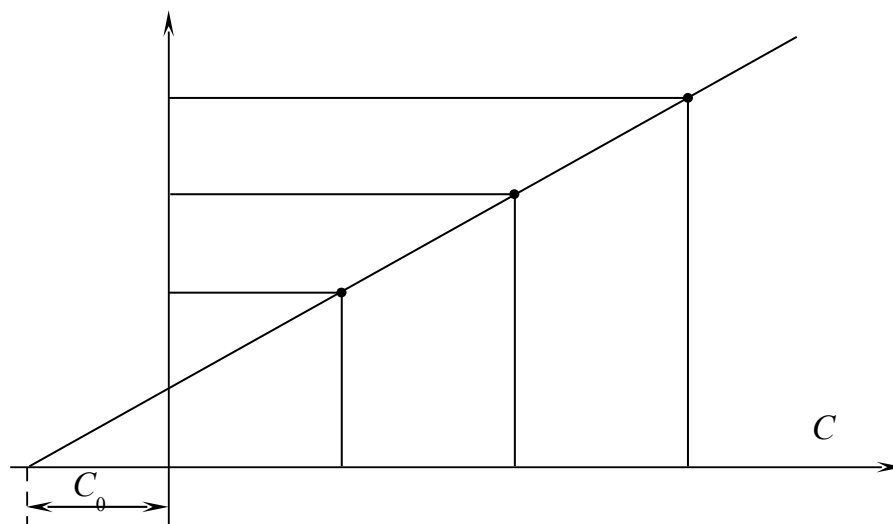


Рисунок 3.16 – График определения собственной емкости катушки индуктивности  $C_0$ .

#### 3.8.2.5. Измерение индуктивности катушек

Измерение индуктивности с использованием шкалы перевода ЕМКОСТЬ – ИНДУКТИВНОСТЬ (см. рис. 3.17) возможно только на частотах, указанных на этой же шкале и обозначенных на шкалах генератора.

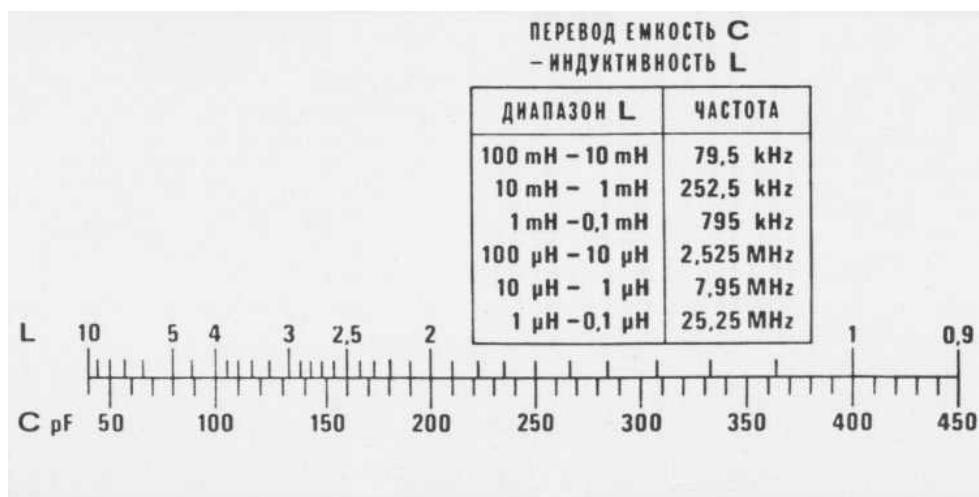


Рисунок 3.17 – Шкала перевода ЕМКОСТЬ – ИНДУКТИВНОСТЬ

Измерение производите следующим образом:

- подберите и установите переключателем и ручкой ЧАСТОТА такую частоту, на которой возможно измерение предполагаемой индуктивности;
- исследуемую катушку подключите к клеммам  $L_x$ ;
- настройте контур в резонанс ручкой ЕМКОСТЬ  $pF$  и отметьте значение емкости при резонансе по шкале емкости измерительного конденсатора.

Если точку резонанса найти не удастся, то величина измеряемой индуктивности лежит за пределами возможных измерений на выбранной частоте. В таком случае, следует выбрать и установить другую частоту и попытаться найти резонанс на другой частоте:

- определите по шкале перевода значение индуктивности для полученного значения емкости при резонансе, учитывая диапазон измеряемых индуктивностей на выбранной частоте.

Примечание.

Индуктивность катушки на любой частоте  $f$  в миллигенри при резонансе можно определить по формуле:

$$L = \frac{25,33}{f^2(C + C_0)}, \quad (3.11)$$

где  $f$  – частота, МГц;  $C$  – емкость измерительного конденсатора при резонансе, пФ;  $C_0$  – собственная емкость катушки, пФ.

Если собственная емкость катушки неизвестна, измерение следует производить на частоте, при которой заведомо  $C \gg C_0$ .

#### 3.8.2.6. Измерение полного сопротивления двухполюсников $Z$

Для этого необходимо:

- из комплекта катушек индуктивности подобрать такую катушку, которая может резонировать на частоте измерения полного сопротивления  $Z$  и подключить ее к клеммам  $L_x$ .
- установить частоту, на которой будет производиться измерение;
- изменением емкости измерительного конденсатора настроить измерительный контур в резонанс и отметить полученные величины  $Q_1$  и  $C_1$ ;
- подключить исследуемый двухполюсник последовательно или параллельно к катушке индуктивности (см. рис. 3.18).

Примечания:

1. При параллельном включении измеряются двухполюсники, имеющие

$$Z \geq R_{\text{eq}},$$

где  $R_{\text{eq}}$  – эквивалентное сопротивление катушки индуктивности, а при последовательном – двухполюсники, имеющие

$$Z \leq r,$$

где  $r$  – активное сопротивление катушки индуктивности.

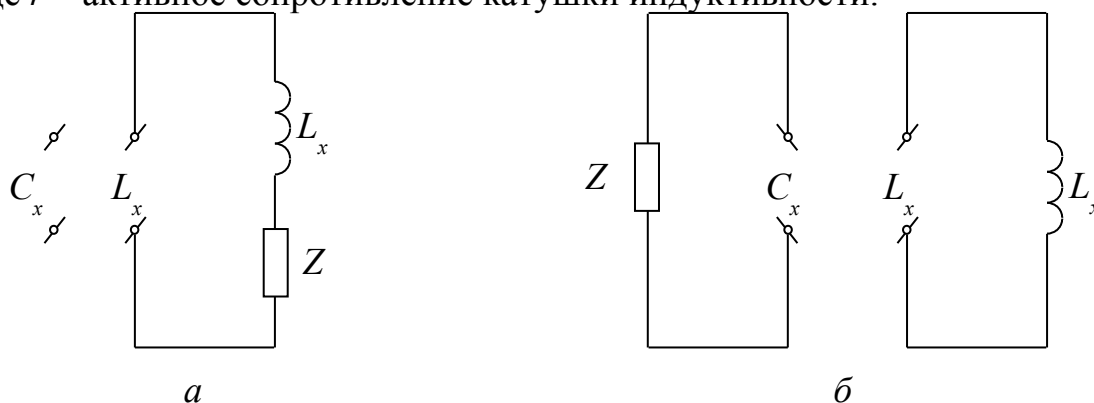


Рисунок 3.18 – Схемы последовательного (а) и параллельного (б) подключения двухполюсника

Рис. 9.1 Схема включения остаточных параметров:

а) - для режима LР; б) - для режима СС

2) для последовательного подключения двухполюсников используйте перемычку из комплекта измерителя добротности.

- ✓ ручкой ЕМКОСТЬ pF настройте контур в резонанс и отсчитайте новые значения  $Q_2$  и  $C_2$ ;
- ✓ рассчитайте величины активного и реактивного сопротивлений, емкость, индуктивность и добротность исследуемого двухполюсника по формулам:

а) Формулы для расчета при последовательном подключении двухполюсника:

$$r = \frac{1}{2\pi f} \left( \frac{1}{C_2 Q_2} - \frac{1}{C_1 Q_1} \right), \quad (3.12)$$

$$X = \frac{C_1 - C_2}{2\pi f C_1 C_2}, \quad (3.13)$$

$$Z = r + jX, \quad (3.14)$$

$$L = \frac{C_1 - C_2}{\omega^2 C_1 C_2}, \quad (3.15)$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}, \quad (3.16)$$

$$Q = \frac{(C_1 - C_2) Q_1 Q_2}{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}. \quad (3.17)$$

При  $C_1 > C_2$  сопротивление  $X$  имеет индуктивный характер, а при  $C_1 < C_2$  – емкостной.

б) Формулы для расчета при параллельном подключении двухполюсника:

$$R = \frac{Q_1 Q_2}{\omega (C_2 Q_1 - C_1 Q_2)}, \quad (3.18)$$

$$X = \frac{1}{\omega (C_2 - C_1)}, \quad (3.19)$$

$$Z = \frac{1}{G}, \quad (3.20)$$

$$G = \frac{1}{R} - j \frac{1}{X}. \quad (3.21)$$

При емкостном характере двухполюсника:

$$X_C = - \frac{1}{\omega C}, \quad (3.22)$$

При индуктивном характере:

$$X_L = \omega L. \quad (3.23)$$

Двухполюсник имеет емкостной характер при  $C_1 > C_2$  и индуктивный при  $C_1 < C_2$ .

$$C = C_1 - C_2, \quad (3.24)$$

$$L = \frac{1}{\omega^2(C_2 - C_1)} \quad (3.25)$$

Добротность двухполюсника:

$$Q = \frac{(C_1 - C_2)Q_1Q_2}{C_1(Q_1 - Q_2)} \quad (3.26)$$

3.8.2.7. Измерение емкости и добротности конденсаторов емкостью менее 425 пФ

При измерении:

- ♦ установите частоту, на которой требуется измерить емкость и добротность конденсатора;
- ♦ из комплекта катушек индуктивности выберите такую, которая может резонировать на частоте измерения, и подключите ее к клеммам  $L_x$ ;
- ♦ настройте измерительный контур в резонанс и отметьте полученные величины  $Q_1$  и  $C_1$ ;
- ♦ к клеммам  $C_x$  подключите измеряемый конденсатор, снова настройте в резонанс и определите новые значения  $C_2$   $Q_2$ .

Если резонанс не удастся найти, значит, емкость подключенного конденсатора больше  $Q$ . В таком случае, выбором другой вспомогательной катушки или другой частоты установите резонанс при достаточно большой емкости  $C_1$ .

Емкость и добротность исследуемого конденсатора определяется по формулам:

$$C_x = C_1 - C_2, \quad (3.27)$$

$$Q_{cx} = \frac{(C_1 - C_2)Q_1Q_2}{(Q_1 - Q_2)(C_1 + C_0)} \quad (3.28)$$

Эффективное шунтирующее сопротивление конденсатора определяется по формуле:

$$R_C = \frac{Q_1Q_2}{\omega C_1(Q_1 - Q_2)} \quad (3.29)$$

3.8.2.8. Измерение емкости конденсаторов емкостью более 425 пФ

При измерении:



- установите частоту, на которой требуется измерить емкость и добротность конденсатора;
- из комплекта катушек индуктивности выберите такую, которая может резонировать на частоте измерения, и подключите ее к клеммам  $L_x$ ;
- настройте измерительный контур в резонанс и отметьте полученные величины  $Q_1$  и  $C_1$ ;
- с помощью перемычки из комплекта измерителя добротности подсоедините исследуемый конденсатор последовательно с катушкой индуктивности к клеммам  $L_x$ ;
- настройте контур в резонанс и отметьте полученные величины  $Q_2$  и  $C_2$ ;
- определите емкость и добротность исследуемого конденсатора по формулам

$$C_x = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}, \quad (3.30)$$

$$Q_{cx} = \frac{(C_1 - C_2) Q_1 Q_2}{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}. \quad (3.31)$$

#### 3.8.2.9. Измерение параметров двухполюсников

При измерении параметров двухполюсников по п.п. 3.8.2.6–3.8.2.8 следует помнить, что погрешность таких измерений значительно зависит от значений измеряемых параметров и способов подключения элементов двухполюсников к измерителю добротности, поэтому в каждом отдельном случае необходимо производить оценку погрешностей измерения.

Например, при измерении очень малых или очень больших сопротивлений отсчитанные значения добротности при первом и втором измерениях будут близки. Поскольку в формулы входит разность между этими добротностями, эта разность может в отдельных случаях оказаться соизмеримой или равной цене деления шкалы добротности.

Кроме перечисленных выше измерений, с помощью измерителя добротности возможно измерение параметров электромагнитных материалов, параметров диэлектрических материалов и т. д. Методику и технику проведения таких измерений можно найти в специальной литературе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как правильно выбрать предел измерения?

2. Зачем устанавливают ручкой "Чувствительность" отклонение стрелки индикатора в пределах  $2/3$  шкалы?

3. Состав и назначение основных частей прецизионных мостов переменного тока.

4. Назначение подключения двухэлектродной конструкции измеряемых объектов по 2-, 3-, 4- и 5-зажимной схеме.

5. Объясните возникновение дополнительной погрешности за счет остаточных параметров.

6. Как определить и учесть собственную емкость катушки индуктивности в измерителе добротности BM560?

## 4. ЗАДАЧИ ПО РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ $RLC$

4.1. Дан четырехплечий мост постоянного тока (рис. 4.1), параметры плеч которого приведены в табл. 4.1. Определить: 1) сопротивление  $R_{10}$ , при котором мост уравновешен; 2) чувствительность схемы по току вблизи состояния равновесия.

Параметры источника питания и указателя равновесия даны в таблице 4.2.

4.2. Мост постоянного тока (рис. 4.1) с термометром сопротивления  $R_T = R_1$  уравновешен при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Определить: 1) сопротивление остальных плеч моста, обеспечивающих максимальную чувствительность по напряжению; 2)

выходное напряжение моста при изменении температуры на  $10^\circ\text{C}$ , если чувствительность датчика равна  $0,4\%/^\circ\text{C}$  и  $R_u = 0$ . Сопротивление датчика при температуре  $20^\circ\text{C}$  приведено в табл. 4.3, параметры источника и указателя равновесия – в табл. 4.4.

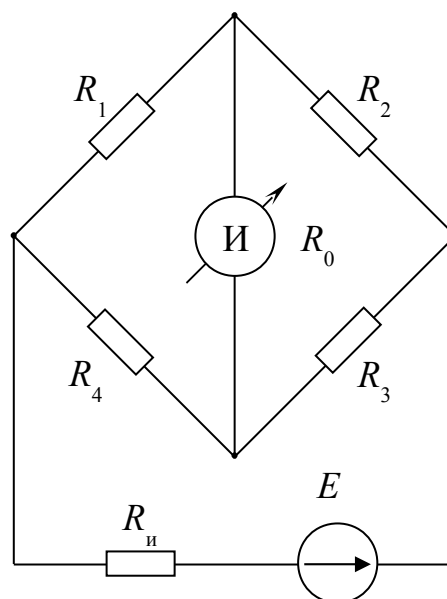


Рисунок 4.1

Таблица 4.1 – Исходные данные к задаче 4.1

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_2$ , Ом	30	600	800	50	300	20	75	25	150	100
$R_3$ , Ом	1500	200	300	100	250	25	600	50	250	600
$R_4$ , Ом	1000	400	150	200	500	100	400	40	100	300

Таблица 4.2 – Исходные данные к задаче 4.1

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_0$ , Ом	20	150	850	350	35	10	16	50	200	1000
$R_u$ , Ом	0	200	100	10	50	1000	20	100	25	1000

Таблица 4.3 – Исходные данные к задаче 4.2

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_T$ , Ом	20	50	100	200	250	300	500	600	800	1000

Таблица 4.4 – Исходные данные к задаче 4.2

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_0$ , Ом	100	20	200	1000	300	80	35	150	16	80
$E_n$ , В	2,4	1,0	2,0	3,6	4,0	6,0	1,2	4,5	3,0	1,5

4.3. Мост постоянного тока (рис. 4.1) состоит из четырех одинаковых сопротивлений, значения которых приведены в табл. 4.5. Определить: 1) сопротивление источника питания, обеспечивающее режим  $E = \text{const}$ ; ток в диагонали указателя равновесия при изменении сопротивления  $R_1$  на 0,1%. Параметры источника питания и указателя равновесия взять из табл. 4.4

Таблица 4.5 – Исходные данные к задаче 4.3

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1 = R_1 =$ $R_3 = R_4$ , Ом	20	50	100	200	240	360	600	150	80	1000

4.4. Определить составляющие неизвестного комплексного сопротивления, измеряемого мостом переменного тока (рис. 4.2), если мост уравновешен при сопротивлениях остальных плеч, взятых из табл. 4.6. Определить ток в диагонали указателя равновесия, если относительное изменение каждой составляющей сопротивления  $z_1$  равно 0,001. Параметры источника питания и указателя равновесия приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.6 – Исходные данные к задаче 4.4

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$z_2$ , Ом	100	$30+j150$	$200+j20$	$50+j200$	50	$-j40$	$40+j20$	100	50	$50+j50$
$z_3$ , Ом	100	300	20	200	$20+j20$	40	20	50	$100+j100$	10
$z_4$ , Ом	$100+j100$	100	100	1000	$j80$	$20+j10$	$82-j36$	$100+j100$	200	20

Таблица 4.7 – Исходные данные к задаче 4.4

Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_n$ , В	1,0	2,0	5,0	10,0	3,6	2,4	1,2	4,0	1,5	3,0
$z_n$ , Ом	$j10$	100	$10+j100$	1000	300	200	$100+j10$	60	$50+j10$	600
$z_0$ , Ом	100	$j50$	300	1000	$100+j10$	300	200	600	150	$10+j100$

4.5. Параметры двух плеч моста переменного тока, изображенного на рис. 4.2, заданы в соответствии с табл. 4.8. Рассчитать параметры двух других плеч так, чтобы обеспечить равновесие моста на заданной частоте. Сопротивление  $z_3$  выбрать чисто активным.

4.6. Определить абсолютную  $\Delta R$  и относительную  $\Delta R/R$  погрешности косвенных измерений сопротивления  $R = U/I$  резистора (рис. 4.3), если показания вольтметра  $U = 10$  В, миллиамперметра  $I = 100$  мА. Предел измерения вольтметра 15 В, класс точности 1,0; предел измерения миллиамперметра 150 мА, класс точности 1,5.

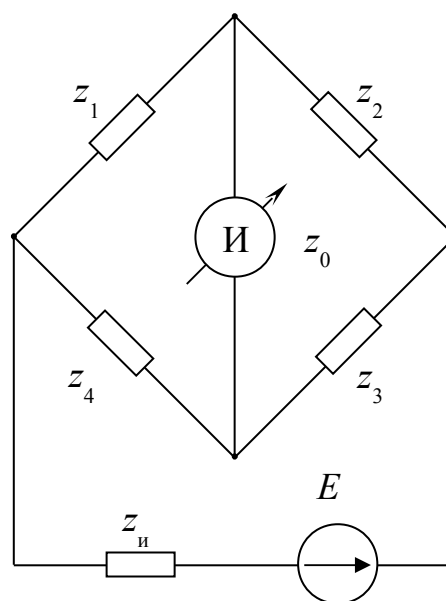


Рисунок 4.2

Таблица 4.8 – Исходные данные к задаче 4.5

Последняя цифра шифра	$Z_1$	$Z_2$	$f$
0	$L_1 = 0,5 \text{ Гн};$ $R_1 = 200 \text{ Ом}$	$C_2 = 1 \text{ мкФ};$ $\text{tg } \delta = 0,02$	100 Гц
1	$C_1 = 0,01 \text{ мкФ};$ $\text{tg } \delta = 0,01$	$R_2 = 15 \text{ кОм}$	2000 Гц
2	$C_1 = 100 \text{ пФ}$	$C_2 = 1000 \text{ пФ};$ $\text{tg } \delta = 0,001$	100 кГц
3	$R_1 = 50 \text{ кОм}$	$C_2 = 1000 \text{ пФ};$ $\text{tg } \delta = 0,01$	10 кГц
4	$L_1 = 100 \text{ мГн};$ $R_1 = 100 \text{ Ом}$	$R_2 = 5000 \text{ Ом}$	1000 Гц
5	$L_1 = 500 \text{ мГн};$ $R_1 = 50 \text{ Ом}$	$L_2 = 0,1 \text{ Гн};$ $R_2 = 10 \text{ Ом}$	15 кГц
6	$R_1 = 100 \text{ Ом}$	$C_2 = 10 \text{ пФ};$ $\text{tg } \delta = 0,02$	50 Гц
7	$L_1 = 1 \text{ мГн};$ $R_1 = 1 \text{ Ом}$	$C_2 = 100 \text{ пФ}$	200 кГц
8	$L_1 = 10 \text{ мГн};$ $R_1 = 100 \text{ кОм}$	$L_2 = 5 \text{ мГн};$ $R_2 = 80 \text{ кОм}$	10 кГц
9	$R_1 = 10 \text{ кОм}$	$L_2 = 50 \text{ мГн};$ $R_2 = 200 \text{ Ом}$	1000 Гц

4.7. Определить значение эквивалентного сопротивления  $Z_{\Sigma} = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma}$  цепи (рис. 4.4) и сопротивления  $Z$  каждой ветви, если показания амперметра  $I = 5 \text{ А}$ , вольтметра  $U = 100 \text{ В}$ , ваттметра  $P = 250 \text{ Вт}$ .

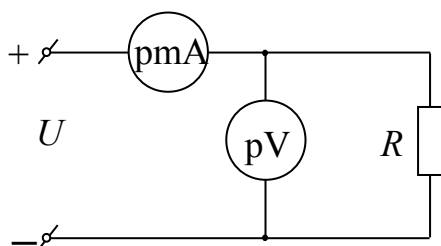


Рисунок 4.3

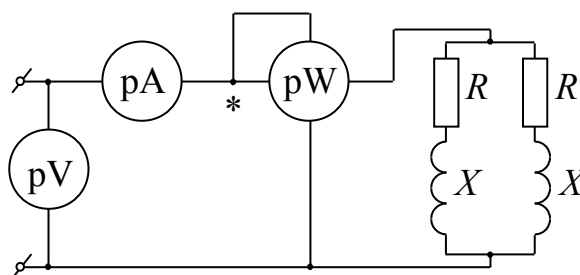


Рисунок 4.4

4.8. Определить значение высокоомного сопротивления  $R_x$ , измеренного методом замещения (рис. 4.5), если при подключении образцового сопротивления  $R_0 = 10^5$  Ом к источнику напряжением  $U$  отклонение  $\alpha_0$  подвижной части гальванометра равно 50 делениям (положение 1). При переключении на измеряемое сопротивление  $R_x$  (положение 2)  $\alpha_x = 10$  делениям. Внутреннее сопротивление гальванометра  $R_r = 500$  Ом.

4.9. В схеме аналогового комбинированного прибора (авометра) для измерения сопротивления на постоянном токе используется метод одного амперметра (рис. 4.6). 1) Написать выражение, связывающее ток  $I$  с данными цепи:  $U$ ,  $R_0$ ,  $R_x$ ,  $R_A$ . 2) Проанализировать характер шкалы микроамперметра, отградуированного в омах. 3) Вычислить значение  $R_{огр}$  для измерения  $R_x$  на пределах 0 – 300 кОм. Напряжение автономного источника питания  $U = 1,5$  В. Магнитоэлектрический микроамперметр имеет падение напряжения  $U_A = 75$  мВ, ток полного отклонения  $I_A = 50$  мкА.

4.10. Для измерения емкости  $C_x$  конденсатора на переменном токе используется метод одного вольтметра (рис. 4.7). Измерение напряжения  $U_{C_x}$  на конденсаторе емкостью  $C_x$ , включенном последовательно с ограничивающим сопротивлением  $R_{огр}$ , выполняется выпрямительным вольтметром, шкала которого проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения. Питание цепи  $R_{огр}C_x$  осуществляется от синусоидального напряжения  $U$  сети частотой  $f$ . 1) Написать выражение, связывающее  $U_{C_x}$  с данными цепи  $U$ ,  $f$ ,  $R_{огр}$ ,  $C_x$ . 2) Проанализировать характер шкалы вольтметра, отградуированной в значениях емкости.

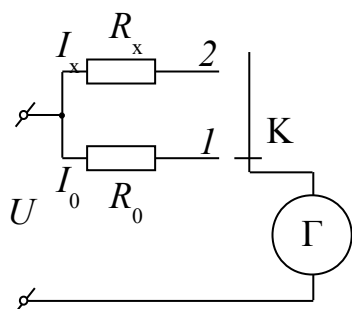


Рисунок 4.5

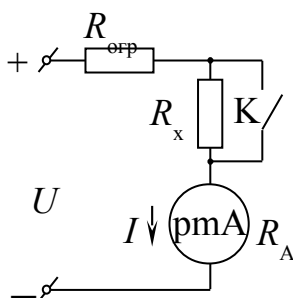


Рисунок 4.6

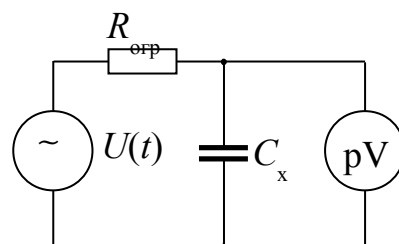


Рисунок 4.7

4.11. В аналоговом комбинированном приборе (авометре типа Ц435) при измерении емкости  $C_x$  конденсатора используется схема, представленная на рис. 4.7. 1) Написать числовое выражение  $U_C$  в функции

$C_x$  (предварительно ознакомившись с решением задачи 4.10), если принять  $U = 220 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $R_{\text{отр}} = 300 \text{ кОм}$ ,  $C_x = X \text{ мкФ}$ . 2) Вычислить  $U_{C_x}$  для значений  $C_{x1} = 0,5 \text{ мкФ}$ ,  $C_{x2} = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $C_{x3} = 0,05 \text{ мкФ}$ ,  $C_{x4} = 0,01 \text{ мкФ}$ ,  $C_{x5} = 0,005 \text{ мкФ}$ . 3) Можно ли данную схему использовать для измерения емкости электролитических конденсаторов?

4.12. Привести точные формулы определения сопротивления  $R_x$ , если измерение выполнялось методом амперметра и вольтметра согласно схемам, показанным на рис. 4.8, а, б. Считать известными показания вольтметра, амперметра – соответственно  $U_V$  и  $I_A$ , а также их внутренние сопротивления  $R_V$  и  $R_A$ .

4.13. Указать, по какой из схем (рис. 4.8, а, б) было выполнено измерение сопротивления, если  $R_{x1} = 0,05 \text{ Ом}$ ,  $R_{x2} = 1500 \text{ Ом}$ .

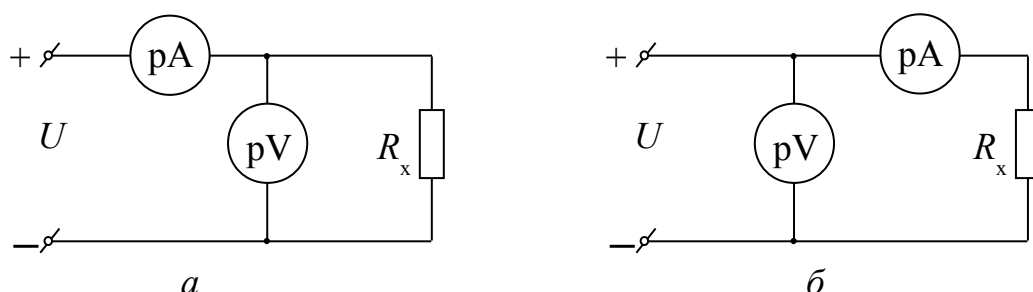


Рисунок 4.8 – Схемы к методу амперметра-вольтметра

4.14. Определить относительные погрешности измерения сопротивления методом амперметра и вольтметра по схемам рис. 4.8, а, б (см. задачу 4.12), если  $R_V = 40 \text{ кОм}$ ; и  $R_A = 0,01 \text{ Ом}$ ;  $R_x = 2 \text{ Ом}$ .

4.15. Каким должно быть критическое сопротивление  $R_{\text{крит}}$  гальванометра в схеме моста (рис. 4.9.), если  $R_0 = 0 \text{ Ом}$ ;  $R_1 = 1 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 2 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 3 \text{ кОм}$ ;  $R_4 = 1,5 \text{ кОм}$ .

4.16. Определить значение сопротивления резистора  $R_x$ , включенного в первое плечо моста (рис. 4.9.), если в уравновешенном состоянии сопротивления других плеч моста составляют  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 2000 \text{ Ом}$ ;  $R_4 = 524 \text{ Ом}$ .

4.17. Определить, какому значению  $R_x$  соответствует состояние баланса моста (рис. 4.9.), если сопротивление

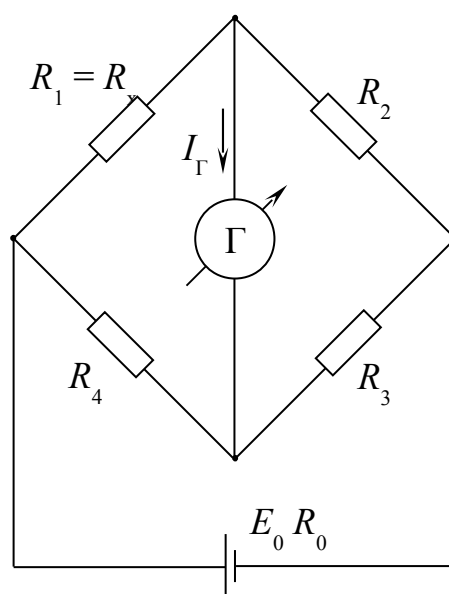


Рисунок 4.9



плеч моста  $R_2 = 5 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 1 \text{ кОм}$ ;  $R_4 = 5 \text{ кОм}$ , внутреннее сопротивление гальванометра  $R_{\Gamma} = 0,6 \text{ кОм}$ . ЭДС идеального источника напряжения  $E = 2 \text{ В}$ . Какой минимальной чувствительностью по току  $S_I$  должен обладать гальванометр, чтобы можно было измерить сопротивление  $R_x$  с относительной погрешностью  $\gamma_{\text{отн}} = 2\%$ ?

4. 18. Определить постоянную гальванометра как функцию процентного отклонения  $\Delta R_x$  от значения номинала  $R_x$  в неуравновешенном мосте постоянного тока, используемого для разбраковки сопротивлений  $R_x$  с номиналом  $100 \text{ Ом} \pm 10\%$ .

Сопротивления плеч уравновешенного моста:  $R_x = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 10 \text{ кОм}$ ;  $R_4 = 100 \text{ Ом}$ , внутреннее сопротивление гальванометра  $R_{\Gamma} = 100 \text{ Ом}$ , постоянная гальванометра по току  $C_I = 10^{-7} \text{ А/дел}$ . Напряжение источника питания  $U = 3 \text{ В}$ .

4.19. Объяснить, почему с помощью одинарного моста (см. рис. 4.9.) не рекомендуется измерять сопротивления менее  $1 \text{ Ом}$ .

4.20. Вывести формулу для определения значений полного сопротивления  $Z_x$ , исходя из условия равновесия одинарного моста переменного тока (рис. 4.10.), если считать известными полные сопротивления остальных плеч моста:  $Z_2 = z_2 e^{j\varphi_2}$ ,  $Z_3 = z_3 e^{j\varphi_3}$ ,  $Z_4 = z_4 e^{j\varphi_4}$  (здесь  $z_2, z_3, z_4$  – значения модулей сопротивлений;  $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – значения фазовых углов).

4.21. Можно ли уравновесить указанные на рис. 4.11, а, б мосты переменного тока?

4.22. Определить значения индуктивности  $L_x$ , сопротивление  $R_x$  в цепи уравновешенного моста (рис. 4.11, а), если для образцовой катушки  $R_2 = 3 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 100 \text{ мГн}$  и сопротивление плеч моста  $R_3 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 10 \text{ Ом}$ .

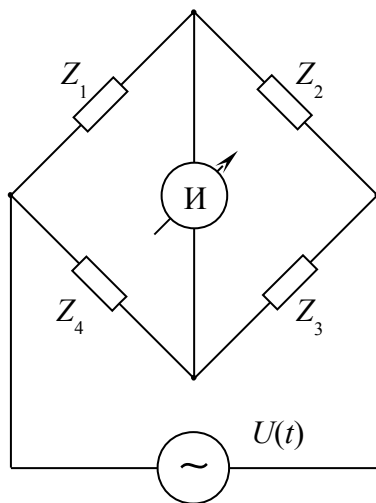


Рисунок 4.10

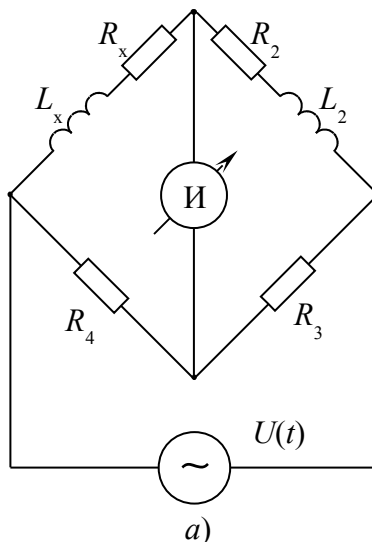
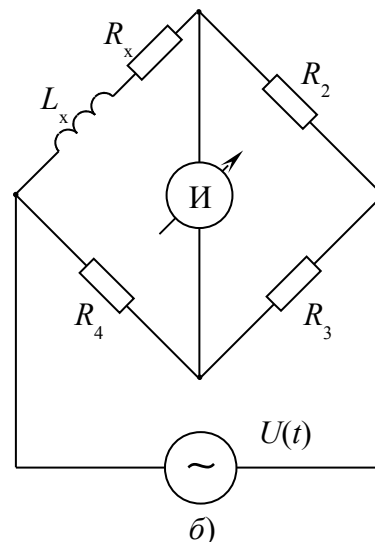


Рисунок 4.11



4.23. Почему в мостах переменного тока (см. рис. 4.10), предназначенных для измерения индуктивностей и емкостей, делают два плеча регулируемыми?

4.24. Определить значения индуктивности  $L_x$ , сопротивления  $R_x$ , добротности  $Q_x$  в цепи уравновешенного моста (рис. 4.12), если  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1000 \text{ Ом}$ ,  $C_3 = 1 \text{ мкФ}$ ,  $R_4 = 100 \text{ Ом}$ , частота  $f$  питающего мост напряжения равна  $1000 \text{ Гц}$ .

4.25. В каких пределах может изменяться добротность  $Q_x$  катушки, если в схеме моста (рис. 4.12) сопротивление плеч сравнения  $R_3$  представляет переменный резистор  $49 \text{ кОм}$ , присоединенный параллельно к конденсатору образцовой емкости  $C_3$ ? При измерении на частоте  $f = 1000 \text{ Гц}$   $C_3 = 0,1 \text{ мкФ}$ .

4.26. Определить значения индуктивности  $L_x$  и сопротивления  $R_x$  неизвестной катушки, если при равновесии моста типа Е7-4 (рис. 4.12) получены следующие данные: плечо множителя  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ; плечо сравнения  $R_3 = 30 \text{ кОм}$ ;  $C_3 = 1 \text{ мкФ}$ ; плечо отсчета  $R_4 = 850 \text{ Ом}$ .

4.27. Написать условия равновесия для схемы моста (рис. 4.13), применяемой при измерении индуктивности  $L_x$  и сопротивления  $R_x$  неизвестной катушки с добротностью  $Q_x > 30$ .

4.28. В схеме моста (рис. 4.13) измерение тангенса угла потерь  $\text{tg } \delta_x$  катушки индуктивности осуществляется при следующих данных: плеча сравнения –  $C_3 = 0,1 \text{ мкФ}$  и переменного резистора –  $R_3 = 1,6 \div 52,2 \text{ Ом}$ . Каково значение добротности при частоте измерения  $1000 \text{ Гц}$ ?

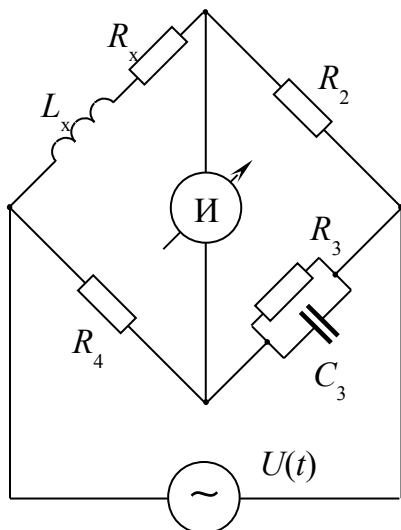


Рисунок 4.12

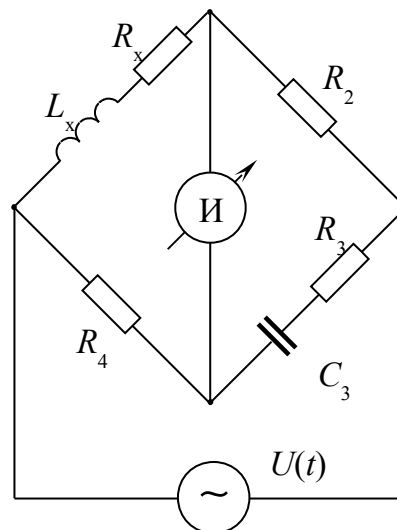


Рисунок 4.13

4.29. Определить значение погрешности, с которой выполнено измерение индуктивности задаче 4.26, если основная погрешность моста типа Е7-4 задана в виде двух составляющих: аддитивной  $\pm(1+6/L)\%$  и мультипликативной  $\pm(1+6/R)\%$  при измерении на частоте 100 Гц, где  $L$  выражается в микрогенри, а  $R$  – в омах.

4.30. Определить входное сопротивление  $R_{вх}$  уравновешенного моста (см. рис. 4.12) со стороны зажимов диагонали индикатора равновесия, если  $R_1 = 10$  Ом,  $L_1 = 0,01$  Гн,  $R_2 = 100$  Ом,  $R_3 = 1000$  Ом,  $C_3 = 1$  мкФ,  $R_4 = 100$  Ом, частота  $f$  питающего мост напряжения равна 100 Гц.

4.31. Определить емкость  $C_x$  и тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta_x$  конденсатора, если измерение выполнялось по схеме моста (рис. 4.14) на частоте 1000 Гц и плечо множителя  $R_2 = 1$  кОм; плечо отсчета  $R_3 = 500$  Ом, регулируемое сопротивление  $R_4 = 10$  Ом, емкость образцового конденсатора  $C_4 = 0,1$  мкФ.

4.32. Определить погрешность измерения емкости  $C_x$  и тангенса угла потерь  $\operatorname{tg} \delta_x$  конденсатора (см. задачу 4.31), если основные погрешности измерения заданы в виде аддитивной и мультипликативной составляющих  $\pm(1+20/C)\%$ ,  $\pm(5 \cdot 10^{-3} + 0,1 \operatorname{tg} \delta)\%$ , где  $C$  выражается в пикофарадах.

4.33. Вывести уравнение равновесия высокочастотного одинарного Т-образного моста (рис. 4.15), если известны значения сопротивлений  $Z_1 - Z_4$ , внутреннее сопротивление индикатора равновесия  $Z_{и} = \infty$  (вывод дать путем преобразования треугольника сопротивлений  $Z_1 Z_3 Z_4$  в эквивалентную звезду). Определить значения сопротивления  $R_x$  и индуктивности  $L_x$  неизвестной катушки, включенной в плечо  $Z_4$ , если

$Z_1 = Z_3 = 1/(j\omega C_0)$ ,  $C_0 = 100$  пФ,  $Z_2 = R_0 = 10^5$  Ом, частота измерения  $f = 10$  МГц.

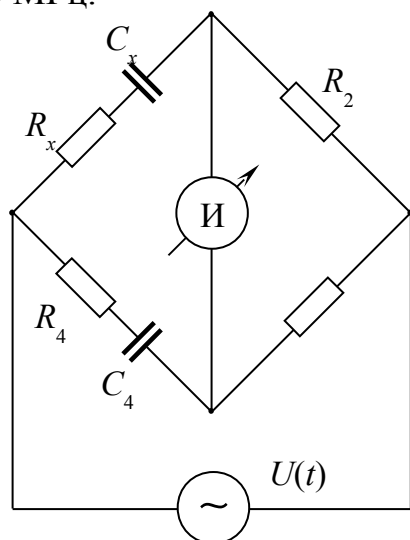


Рисунок 4.14

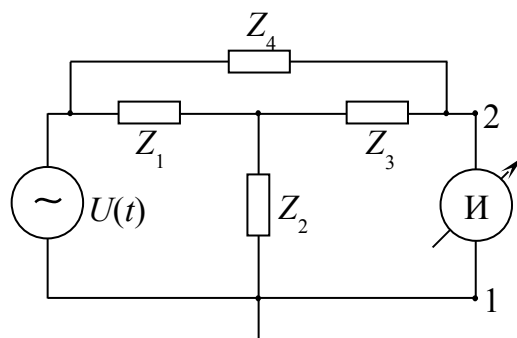


Рисунок 4.15

4.34. Вывести в комплексном виде условия равновесия двойного Т-образного моста (рис. 4.16), считая полные сопротивления плеч моста известными (при выводе принять внутреннее сопротивление источника  $Z_0 = 0$ , а индикатора равновесия  $Z_{\text{и}} = \infty$ ).

4.35. Вывести формулу для определения проводимости  $g_x$ ,  $b_x$  (см. задачу 4.34), используя схему двойного Т-образного моста, выполнить измерение активной  $g_x$  и реактивной  $b_x$  составляющей двухполюсников. Сопротивления плеч указаны на схеме моста (рис. 4.17).

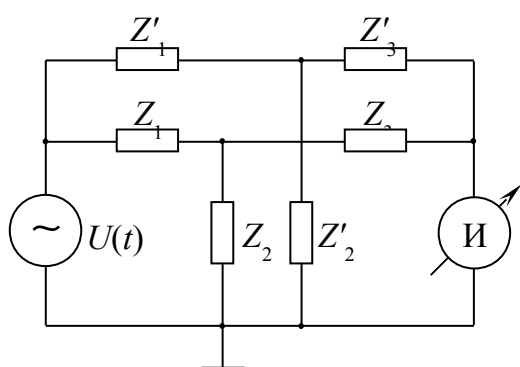


Рисунок 4.16

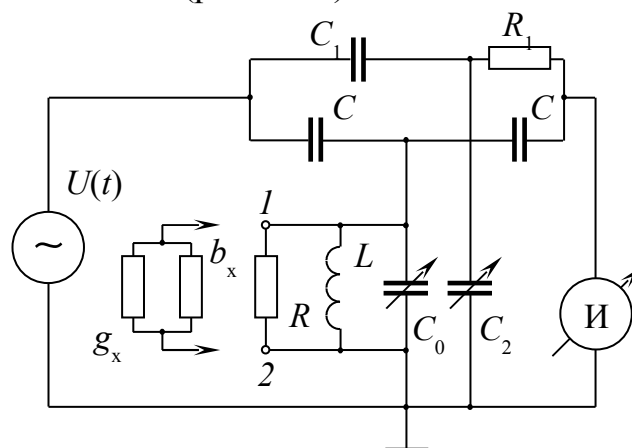


Рисунок 4.17

4.36. Вывести соотношение для определения добротности  $Q_x$  неизвестной катушки индуктивности с  $L = L_x$ ,  $R = R_x$  (рис. 4.18), связывающее добротность с напряжением входа  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$  при измерении

резонансным методом на высокой частоте. Когда градуировка шкалы выходного вольтметра справедлива в значениях  $Q$ ?

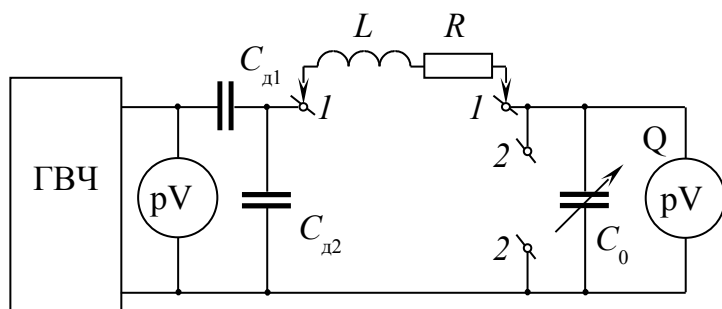


Рисунок 4.18

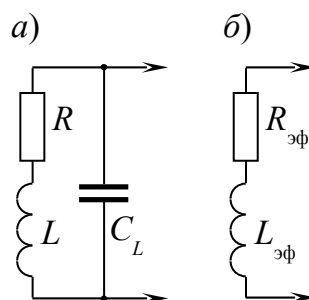


Рисунок 4.19

4.37. Измерение индуктивности куметром (рис. 4.18) на высоких частотах (от 100 кГц и выше) осложнено наличием собственной межвитковой емкости  $C_L$  катушки индуктивности (влияние тем сильнее, чем выше частота, на которой производится измерение). Эквивалентные схемы катушки индуктивности на высоких и на низких частотах представлены на рис. 4.19, а, б. Вывести соотношения, связывающие эффективные значения индуктивности  $L_{эф}$ , сопротивления  $R_{эф}$ , добротности  $Q_{эф}$  с действительными значениями индуктивности  $L$ , сопротивления потерь  $R$ , добротности  $Q$  катушки и межвитковой емкости  $C_L$  и емкости  $C_0$  образцового конденсатора (см. рис. 4.18). При выводе формул принять  $R \ll \omega L$ ;  $R_{эф} \ll \omega L_{эф}$ , где  $\omega = 1/\sqrt{L_{эф}C_0}$  – частота, на которой осуществляется измерение.

4.38. Написать формулу измерения куметром индуктивности катушки  $L_x$  в микрогенри (см. рис. 4.18), если известны: частота измерения в килогерцах, емкость образцового конденсатора  $C_0$  в пикофарадах.

4.39. Определить значения  $L_{мин}$ ,  $L_{мах}$ , которые могут быть измерены куметром (см. рис. 4.18), имеющим диапазон измерения добротности  $Q = 25 \div 625$ , диапазоны изменения частоты генератора высокой частоты ГВЧ  $f = 50 \text{ кГц} \div 50 \text{ МГц}$  и емкости образцового конденсатора  $C_0 = 30 \div 450 \text{ пФ}$ .

4.40. Определить емкость  $C_x$  конденсатора, определяемую по схеме рис. 4.20. Измерение осуществляется настройкой контура в резонанс: а) при закороченных зажимах 1-1 ( $C_{01} = 480 \text{ пФ}$ ); б) при подключении к зажимам

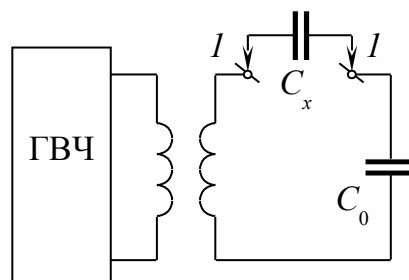


Рисунок 4.20

$I$ - $I$  конденсатора  $C_x$  ( $C_{02} = 1200$  пФ). Частота высокочастотного генератора ГВЧ остается при измерении постоянной.

4.41. Вывести соотношение для определения активной  $R_x$  и реактивной  $X_{Cx}$  составляющих, полного сопротивления  $Z_x$ , соединенных параллельно. Измерение выполняется настройкой контура куметра (см. рис. 4.18) в резонанс.

1) Без  $Z_x$ . К зажимам  $I$ - $I$  подключается образцовая катушка индуктивности, контур куметра изменением емкости образцового конденсатора настраивается в резонанс на частоте  $f$ , снимаются показания емкости  $C_{01}$ , добротности  $Q$ .

2) С  $Z_x$ , подключенным к зажимам 2-2. К зажимам подключается полное сопротивление  $Z_x$  и изменением емкости образцового конденсатора контур куметра настраивается в резонанс на той же частоте  $f$ , при этом снимаются показания  $C_{02}$ .

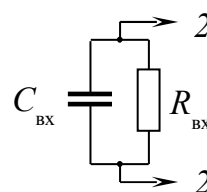


Рисунок 4.21

4.42. Определить значения входных сопротивления  $R_x = R_{Bx}$  и емкости  $C_x = C_{Bx}$  (рис. 4.21) аналогового электронного вольтметра по полученным в процессе измерения куметром (по методике задачи 4.41) данным:  $f = 1,59$  МГц,  $C_{01} = 465$  пФ,  $Q_1 = 155$ ,  $C_{02} = 445$  пФ,  $Q_2 = 150$ .

4.43. Определить значения входных сопротивления  $R_{Bx}$  и емкости  $C_{Bx}$  электронного осциллографа с открытым входом по полученным в процессе измерения куметром (по методике задачи 4.41) данным:  $f = 10$  МГц,  $C_{01} = 390$  пФ,  $Q_1 = 260$ ,  $C_{02} = 360$  пФ,  $Q_2 = 254$ .

4.44. Определить значения входных сопротивления  $R_{Bx}$  и емкости  $C_{Bx}$  аналогового электронного вольтметра, используя данные, полученные при измерении куметром (см. рис. 4.18): 1)  $f = 4$  МГц,  $C_{01} = 55$  пФ,  $Q_1 = 20$ ,  $C_{02} = 25$  пФ,  $Q_2 = 70$ ; 2)  $f = 150$  МГц,  $C_{01} = 420$  пФ,  $Q_1 = 83$ ,  $C_{02} = 390$  пФ,  $Q_2 = 42$ .

4.45. Определить межвитковую емкость  $C_L$  индуктивной катушки (см. рис. 4.19), используя данные измерений куметром на двух частотах  $f_1/f_2 = 2$ : 1)  $f_1 = f$  кГц,  $C_{01} = 54$  пФ; 2)  $f_2 = f/2$  кГц,  $C_{02} = 230$  пФ.

4.46. Мост, изображенный на рис. 4.22, уравновешен при следующих значениях параметров электрической цепи:  $C_1 = 500$  пФ,  $\delta_1 \approx \text{tg } \delta_1 = \omega C_1 R_1 = 0,5$  рад,  $C_3 = 100$  пФ;

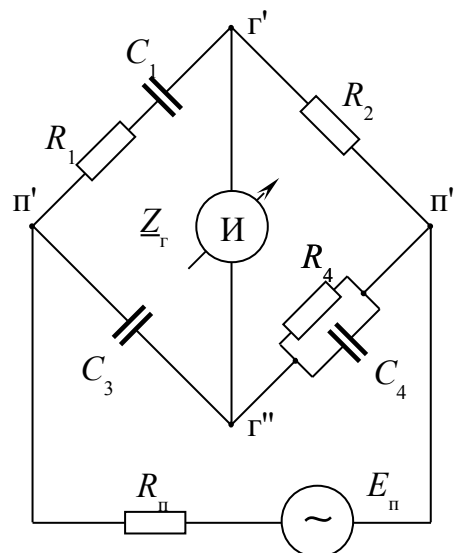


Рисунок 4.22 – Схема моста для измерения емкости с потерями

$\delta_3 \approx \operatorname{tg} \delta_3 = 0$ ,  $R_4 = 10^4/\pi$  Ом,  $f = 50$  Гц. Определите значения  $R_2$  и  $C_4$ , при которых мост уравнивается, если  $\delta_4 \approx \operatorname{tg} \delta_4 = 0$ .

4.47. На рис. 4.22 представлена уравниваемая мостовая цепь. Потери в конденсаторе  $C_1$  учитываются сопротивлением  $R_1$ . Известно, что  $R_2 = 100$  Ом,  $R_4 = 1000$  Ом,  $C_3 = 0,05$  мкФ,  $C_1 = 0,1$  мкФ, мост питается переменным напряжением частоты  $f = 100$  Гц, конденсаторы  $C_3$  и  $C_4$  – без потерь. Определите  $R_1$  и  $C_1$ ,  $\operatorname{tg} \delta_1$ , где  $\delta_1$  – угол потерь конденсатора  $C_1$ .

4.48. На рис. 4.23, а представлена уравниваемая мостовая цепь постоянного тока. Определите  $R_1$ , если известно, что  $R_2 = 100$  Ом,  $R_3 = 25$  Ом,  $R_4 = 50$  Ом.

4.49. На рис. 4.23, б представлена уравниваемая мостовая цепь. Определите  $L_1$ , если известно, что  $L_2 = 100$  мГн,  $R_3 = 100$  Ом,  $R_4 = 50$  Ом.

4.50. Мостовая цепь, изображенная на рис. 4.23, в, уравнивается. Определите  $C_1$ , если известно, что  $C_2 = 1$  мкФ,  $R_3 = 3000$  Ом,  $R_4 = 1500$  Ом.

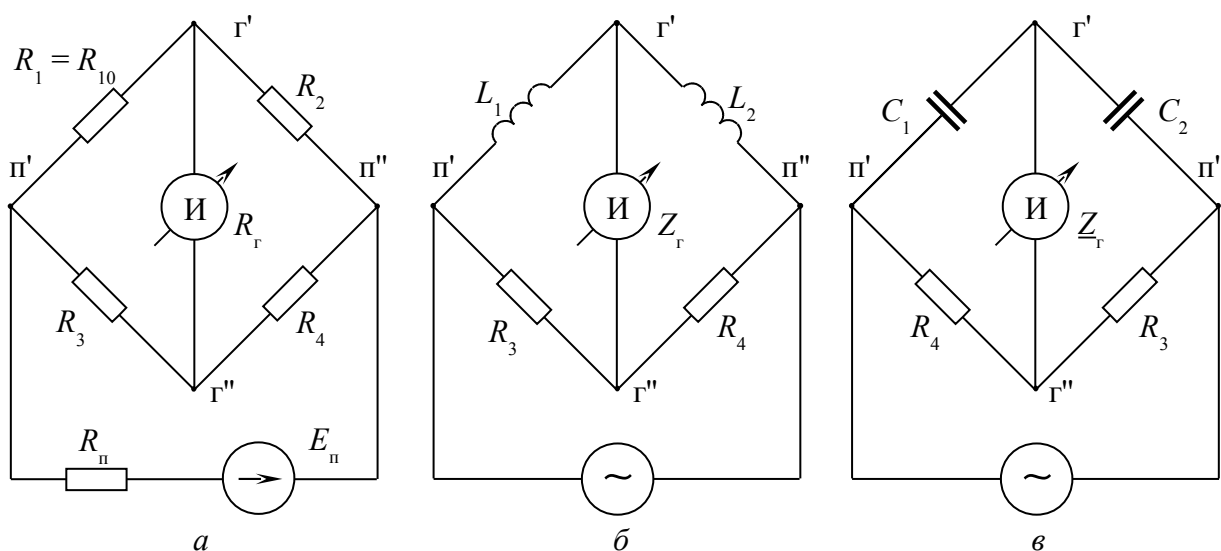


Рисунок 4.23 – Схемы четырехплечих мостов для измерения:  
а – активного сопротивления; б – индуктивности; в – емкости

4.51. Мостовая цепь, изображенная на рис. 4.24, а, уравнивается. Определите  $R_1$  и  $L_1$ , если известно, что  $R_2 = 5$  Ом,  $L_2 = 0,1$  Гн,  $R_3 = 10$  Ом,  $R_4 = 20$  Ом.

4.52. Мостовая цепь, изображенная на рис. 4.24, б, уравнивается. Определите  $R_1$  и  $L_1$ , если известно, что  $R_2 = 100$  Ом,  $C_2 = 0,1$  мкФ,  $R_3 = 100$  Ом,  $R_4 = 200$  Ом.

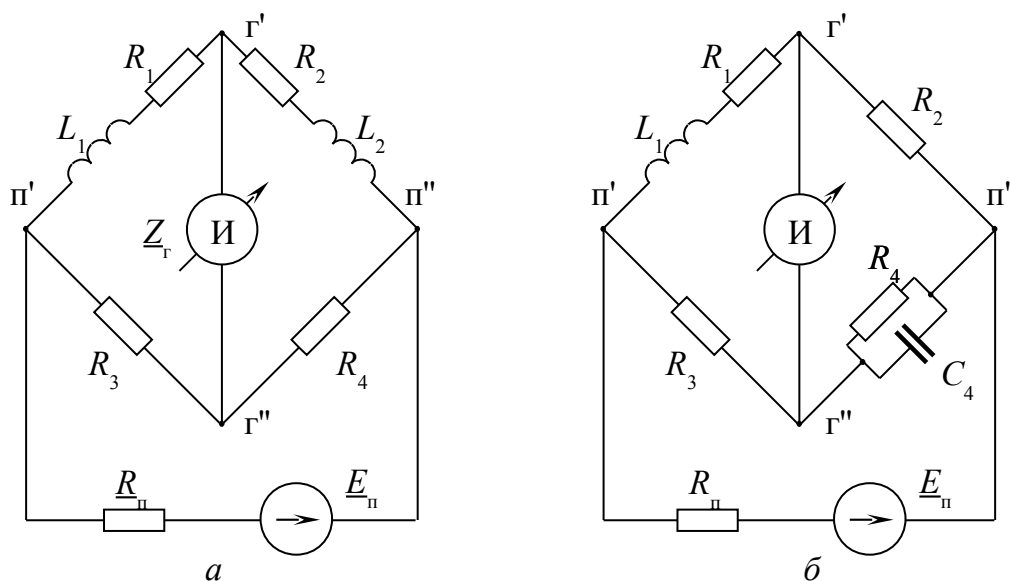


Рисунок 4.24 – Схема моста для измерения индуктивности с использованием образцовой индуктивности (а) и образцовой емкости (б)

4.53. Мостовая цепь, изображенная на рис. 4.25, уравновешена. Определите  $R_1$  и  $C_1$ , если известно, что  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 200 \text{ Ом}$ .

4.54. Мостовая цепь, изображенная на рис. 4.22, уравновешена. Определите  $R_1$ ,  $C_1$  и  $\text{tg } \delta_1$ , где  $\delta_1$  – угол потерь конденсатора  $C_1$ . Потери конденсатора  $C_1$  учитываются сопротивлением  $R_1$ . Известно, что  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 2000 \text{ Ом}$ ,  $C_3 = 0,05 \text{ мкФ}$ , мост питается переменным напряжением частоты  $f = 100 \text{ Гц}$ , конденсаторы  $C_3$  и  $C_4$  – без потерь.

4.55. Дан четырехплечий мост постоянного тока (рис.4.23, а) с сопротивлением  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1500 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 1000 \text{ Ом}$ . Сопротивление гальванометра  $R_r = 100 \text{ Ом}$ , а сопротивление источника питания  $R_{\pi} = 10 \text{ Ом}$ . Определите: 1) сопротивление  $R_{10}$ , при котором мост уравновешен; 2) входное сопротивление моста по отношению к диагонали питания  $R_{\pi\pi''}$ ; 3) входное сопротивление моста по отношению к диагонали указателя равновесия  $R_{\Gamma'\Gamma''}$ ; 4) взаимное сопротивление между ветвью измеряемого сопротивления и ветвью указателя равновесия  $R_{1\Gamma}$ .

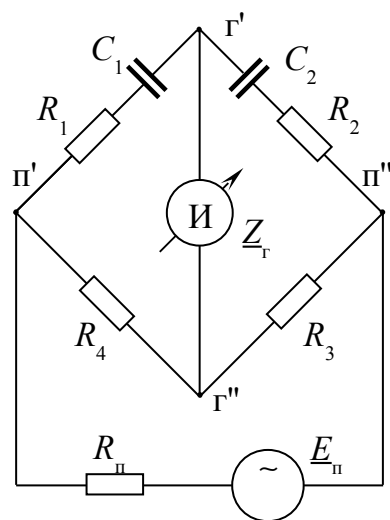


Рисунок 4.25 – Схема моста для измерения емкости с использованием образцовой емкости



Сопротивления  $R_{\Pi\Pi'}$ ,  $R_{ГГ'}$ ;  $R_{1Г}$  определите для уравновешенной мостовой цепи.

4.56. Определите входные сопротивления уравновешенного моста (рис. 4.23, а) со стороны зажимов диагонали питания  $R_{\Pi, \text{вх}0}$  и со стороны зажимов диагонали гальванометра  $R_{Г, \text{вх}0}$ , если известно, что  $R_1 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 100 \text{ Ом}$ .

4.57. Определите входные сопротивления уравновешенного моста (рис. 4.23, б) со стороны зажимов диагонали питания  $Z_{\Pi, \text{вх}0}$  и со стороны зажимов диагонали сравнивающего устройства  $Z_{Г, \text{вх}0}$ , если известно, что  $L_1 = 200 \text{ мГн}$ ,  $L_2 = 100 \text{ мГн}$ ,  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 50 \text{ Ом}$ , частота питающего моста напряжения  $f = 100 \text{ Гц}$ .

4.58. Определите входные сопротивления уравновешенного моста (рис. 4.23, в) со стороны зажимов диагонали питания  $Z_{\Pi, \text{вх}0}$  и со стороны зажимов диагонали сравнивающего устройства  $Z_{Г, \text{вх}0}$ , если известно, что  $X_1 = 1500 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 3000 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1500 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 3000 \text{ Ом}$ .

4.59. Определите входные сопротивления уравновешенного моста (рис. 4.24, а) со стороны зажимов диагонали питания  $Z_{\Pi, \text{вх}0}$  и со стороны зажимов диагонали сравнивающего устройства  $Z_{Г, \text{вх}0}$ , если известно, что  $R_1 = 2,5 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 5 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 60 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 20 \text{ Ом}$ .

4.60. Определите входные сопротивления уравновешенного моста (рис. 4.25) со стороны зажимов диагонали питания  $Z_{\Pi, \text{вх}0}$  и со стороны зажимов диагонали сравнивающего устройства  $Z_{Г, \text{вх}0}$ , если известно, что  $R_1 = 50 \text{ Ом}$ ,  $C_1 = 0,2 \text{ мкФ}$ ,  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 200 \text{ Ом}$ , частота питающего моста напряжения  $f = 100 \text{ Гц}$ .

4.61. Определите входные сопротивления уравновешенного моста (рис. 4.24, б) со стороны зажимов диагонали питания  $Z_{\Pi, \text{вх}0}$  и со стороны зажимов диагонали сравнивающего устройства  $Z_{Г, \text{вх}0}$ , если известно, что  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $L_1 = 0,01 \text{ Гн}$ ,  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $C_4 = 1 \text{ мкФ}$ ,  $R_4 = 1000 \text{ Ом}$ , частота питающего моста напряжения  $f = 100 \text{ Гц}$ .

4.62. Определите входные сопротивления уравновешенного моста (рис. 4.22) со стороны зажимов диагонали питания  $Z_{\Pi, \text{вх}0}$  и со стороны зажимов диагонали сравнивающего устройства  $Z_{Г, \text{вх}0}$ , если известно, что  $R_1 = 200 \text{ Ом}$ ,  $C_1 = 1 \text{ мкФ}$ ,  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $C_3 = 0,05 \text{ мкФ}$ ,  $C_4 = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $R_4 = 2000 \text{ Ом}$ , частота питающего моста напряжения  $f = 100 \text{ Гц}$ .

4.63. Дан четырехплечий мост постоянного тока (рис. 4.23, а) со следующими параметрами: сопротивление плеч  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1500 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 1000 \text{ Ом}$ . Сопротивление гальванометра  $R_Г = 100 \text{ Ом}$ , а сопротивление источника питания  $R_{\Pi} = 10 \text{ Ом}$ . Определите: 1) сопротивление  $R_{10}$ , при

котором мост уравновешен; 2) входное сопротивление моста относительно зажимов  $\Gamma\Gamma''$  при расстоянии равновесия моста  $R_{\Gamma, \text{вх}0}$ ; 3) взаимное сопротивление между ветвью измеряемого сопротивления и ветвью гальванометра при состоянии равновесия моста.

4.64. Дан четырехплечий мост постоянного тока (рис. 4.23, *a*) со следующими параметрами:  $R_2 = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_{\Pi} = 10 \text{ Ом}$ . Определите: 1) сопротивление  $R_{10}$ , при котором мост уравновешен; 2) входное сопротивление моста по отношению к диагонали питания  $R_{\Pi\Pi''}$ ; 3) входное сопротивление моста по отношению к диагонали гальванометра  $R_{\Gamma\Gamma''}$ ; 4) взаимное сопротивление между ветвью измеряемого сопротивления и ветвью гальванометра  $R_{1\Gamma}$ . Сопротивления  $R_{\Pi\Pi''}$ ,  $R_{\Gamma\Gamma''}$ ;  $R_{1\Gamma}$  определите для уравновешенной мостовой цепи.

4.65. На схеме на рис. 4.24, *a* представлена уравновешенная мостовая цепь со следующими параметрами:  $R_1 = R_{10} = 5 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = X_{10} = 15 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_{\Pi} = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_{\Gamma} = 10 \text{ Ом}$ . Определите: 1) входное сопротивление моста по отношению к диагонали питания  $Z_{\Pi\Pi''}$ ; 2) входное сопротивление моста по отношению к диагонали сравнивающего устройства  $Z_{\Gamma\Gamma''}$ ; 3) взаимное сопротивление между ветвью измеряемого сопротивления и ветвью сравнивающего устройства  $Z_{1\Gamma}$ .

4.66. На рис. 4.25 представлена уравновешенная мостовая цепь со следующими параметрами:  $R_1 = R_{10} = 100 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = X_{10} = 1/\omega C_1 = 1500 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 200 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 1/\omega C_2 = 3000 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 500 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 1000 \text{ Ом}$ ,  $R_{\Pi} = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_{\Gamma} = 100 \text{ Ом}$ . Определите: 1) входное сопротивление моста по отношению к диагонали питания  $Z_{\Pi\Pi''}$ ; 2) входное сопротивление моста по отношению к диагонали сравнивающего устройства  $Z_{\Gamma\Gamma''}$ ; 3) взаимное сопротивление между ветвью измеряемого сопротивления и ветвью сравнивающего устройства  $Z_{1\Gamma}$ .

4.67. На рис. 4.22 представлена уравновешенная мостовая цепь со следующими параметрами:  $R_1 = R_{10} = 200 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = X_{10} = 1/\omega C_1 = 15 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ ,  $X_3 = 1/\omega C_3 = 3 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 500 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 2 \text{ кОм}$ ,  $X_4 = 1/\omega C_4 = 15 \text{ кОм}$ ,  $R_{\Pi} = 500 \text{ Ом}$ ,  $R_{\Gamma} = 400 \text{ Ом}$ . Определите: 1) входное сопротивление моста по отношению к диагонали питания  $Z_{\Pi\Pi''}$ ; 2) входное сопротивление моста по отношению к диагонали сравнивающего устройства  $Z_{\Gamma\Gamma''}$ ; 3) взаимное сопротивление между ветвью измеряемого сопротивления и ветвью сравнивающего устройства  $Z_{1\Gamma}$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему сопротивление указателя равновесия не входит в условие равновесия мостовой схемы?
2. По каким признакам классифицируются мостовые схемы?
3. Назовите основные источники погрешностей схем уравнивания.
4. Как учитывается сопротивление источника питания при расчете мостовых схем?
5. Как учитывается сопротивление указателя равновесия при расчете мостовых схем?
6. Какие соотношения между параметрами мостовых схем обеспечивают максимальную чувствительность?

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. [Котур В. И.](#) Электрические измерения и электроизмерительные приборы / В.И. Котур, М.А. Скомская, Н.Н. Храмова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. - 400 с.
2. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения / Ф.В. Кушнир. – Л: Энергоатомиздат, 1983 – 320 с.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин / Э.Г. Атамалян. –М: Высшая школа, 1989 – 384 с.
4. Электрические измерения / Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1985.– 416 с.
5. Мейзда Ф. Электрические измерительные приборы и методы измерений (пер. с английского) / Ф. Мейзда – М: Мир, 1990 – 536 с.
6. Панфилов В. А. Аналоговые методы и средства электрических измерений / В. А.Панфилов – М.: НТФ "Энергопрогресс", 2006.
7. Демидова-Панферова Р. М. Задачи и примеры расчетов по электроизмерительной технике / Р.М. Демидова-Панферова, В.Н. Малиновский, Ю.С. Солодов – М.: Энергоатомиздат, 1990.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1 – Типы некоторых промышленных конденсаторов и их характеристики

Группа конденсаторов по виду диэлектрика	Сокращенное обозначение	Емкость	Рабочее напряжение, В	$\text{tg } \delta \times 10^4$ при $20^\circ \text{C}$ на $f$ , Гц	Область применения
1	2	3	4	5	6
Слюдяные	K31	47–200000	100–1600	10–20 на $f = 10^6$	Блокировка, шунтирующие и высокочастотные фильтровые цепи, емкостная связь в цепях линии задержки, образцовые емкости
Полистирольные фольговые	K70	1–500000	35(10)–1600	10–15 на $f = 10^6$	Контуры высокой добротности, интегрирующие устройства, точные временные цепи
Полистирольные металлизированные	K71	0,003–2 пФ·мкФ	100–1000	10–15 на $f = 10^6$	
Фторопластовые Фольговые	K72	470–1 пФ-мкФ	200–1600	5–10 на $f = 10^3$	В тех же цепях, что и полистирольные, но при повышенных температурах я более жестких требованиях к электрическим параметрам
Фторопластовые Металлизированные	K72	0,01–2,2 пФ·мкФ	200–500	15 на $f = 10^3$	
Пленочные (ПЭТФ): фольговые	K74	1000 пФ–1мкФ	50–630	80; 100 на $f = 50$ ; $10^3$	Блокировочные, буферные, шунтирующие, фильтровые, развязывающие цепи, емкостная связь (при повышенных требованиях к $R_{из}$ и коэффициенту абсорбции)
Пленочные (ПЭТФ): металлизированные	K73	1000 пФ–15 мкФ	100–1000	100; 150 на $f = 50$ ; $10^3$	
Комбинированные	K75	1000 пФ–22 мкФ	250–1600	80; 100 на $f = 10^3$	То же (при повышенных требованиях к надежности)
Лакопленочные	K76	0,47–22 мкФ	35–250	120–150 на $f = 50$	То же

Поликарбонатные	K77	0,001– 100 мкФ	63–400	25–30 на $f = 50$	То же
-----------------	-----	-------------------	--------	----------------------	-------

Продолжение таблицы П.1

1	2	3	4	5	6
Алюминиевые фольговые	K50	0,5–5000	3–500	1000–3500	Фильтры в цепях питания, шунтирующие цепи
Танталовые фольговые	K51	1–470	6,3–160	1500–5000	То же, а также в цепях связи низкой частоты, в цепях развязки
Танталовые объемнопористые	K52	0,1–100	2–600	500–3000	То же, преимущественно в транзисторной технике
Оксиднополупроводниковые	K53	0,022–100	2–125	600–3000	Фильтры в цепях питания, шунтирующие цепи, цепи связи и развязки, преимущественно в транзисторной технике

Таблица П.2 – Основные характеристики мер емкости

Тип меры	Номинальное значение емкости, пФ	Диапазон частоты, Гц	Предел допускаемой основной погрешности, %	Начальная емкость, пФ	Допускаемое значение тангенса
1	2	3	4	5	6
P533	50; (1; 2; 3; 4)·10 <sup>n</sup> , где $n = 2; 3$	40 – 1·10 <sup>4</sup>	±(0,05 + 10/C), где C - емкость пФ	-	1·10 <sup>-4</sup>
P534/1	15	40 – 1·10 <sup>4</sup>	±0,05	15±0,05	
P534/2	20 – 60		±0,2	20±0,2	
P534/3	25 - 150		±0,5	2±0,5	
KME-11	1·10 <sup>-3</sup> 1·10 <sup>-2</sup> 1·10 <sup>-1</sup>	1·10 <sup>3</sup> - 1·10 <sup>4</sup>	±(0,05+ +5·10 <sup>-4</sup> /C <sub>ном</sub> ) ±(0,2+ +5·10 <sup>-4</sup> /C <sub>ном</sub> )	-	5·10 <sup>-5</sup>
KME-101	10	1·10 <sup>3</sup> - 1·10 <sup>5</sup>	±0,05; ±0,2		
E1-3	1·10 <sup>2</sup> - 1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>3</sup> - 1·10 <sup>8</sup>	±0,1		-

P597/1 - P597/19	$(1; 2; 3; 4) \cdot 10^n$ , где $n = 0 \div 5$ ; $1 \cdot 10^6$	$40 - 1 \cdot 10^5$	$\pm 0,05$		$5 \cdot 10^{-5} -$ $2 \cdot 10^{-3}$
P5050	1; 10; 100; 1000	$40 - 1 \cdot 10^5$	$\pm 0,02$	-	$5 \cdot 10^{-5}$

Продолжение таблицы П.2

1	2	3	4	5	6
P5076	0 - 35 (цена деления шкалы 0,1 пФ)	10 <sup>3</sup>	±0,2·35/ <i>C</i> , где <i>C</i> - емкость	≤15	1·10 <sup>-4</sup>
P5092	0 – 16	40 – 1·10 <sup>5</sup>	±0,5	-	
P5093	0 – 160		±0,2		
P5094	0 - 510		±0,5		
P544	220 - 1,1111·10 <sup>6</sup>	40 – 1·10 <sup>4</sup>	±0,2·(1 + + 0,0044/ <i>C</i> ), где <i>C</i> – емкость, мкФ	≤ 220	2·10 <sup>-3</sup>
P583	2·10 <sup>2</sup> - 111,1·10 <sup>6</sup>	40 - 2·10 <sup>4</sup>	± (0,2 + + 0,0064/ <i>C</i> ), где <i>C</i> – емкость, мкФ	220	1,5·10 <sup>-2</sup>
P5025	0 - 111,0001·10 <sup>6</sup>	40 - 4·10 <sup>4</sup>	±0,1(1 + + 0,0032/ <i>C</i> ) – для декад с емкостью до 1 мкФ ( <i>C</i> - емкость); ±0,5 для декад 1 - 10 и 10 - 100	220	1·10 <sup>-3</sup> – 5·10 <sup>3</sup>
M1000	1·10 <sup>8</sup> - 1·10 <sup>9</sup>	50 - 1·10 <sup>3</sup>	±0,2	-	1·10 <sup>-2</sup>
M10000	1·10 <sup>9</sup> - 1·10 <sup>10</sup>	50 - 1·10 <sup>3</sup>	±0,5	-	5·10 <sup>-2</sup>
P5086	1 - 1·10 <sup>10</sup>	40 - 1·10 <sup>10</sup>	±(0,1-1)	-	10·10 <sup>-4</sup> - 1
P5096	1·10 <sup>-1</sup> - 8·10 <sup>7</sup>	1·10 <sup>3</sup>	± (0,02 - 0,2)	-	5·10 <sup>-5</sup> - 1

Таблица П.3. – Основные характеристики мер индуктивности и взаимной индуктивности

Тип меры	Назначение	Номинальные значения индуктивности, Гн	Диапазон частот, Гц	Погрешность аттестации меры, %	Предел допускаемой основной погрешности. %
1	2	3	4	5	6
P596/1 - P596/25	Катушки индуктивности образцовые	$1 \cdot 10^{-6} - 1$	$80 - 1 \cdot 10^5$	$\pm(0,02 + 1/L)$ - при частоте 1 кГц; $\pm(0,05 + 2/L)$ - при 0,5; 5; 10 кГц; $\pm(0,2 + 2/L)$ - при 0,08; 50; 100 кГц, где $L$ - значение индуктивности, мкГн	-
P593	Образцовые меры индуктивности и добротности	$(1; 3) \cdot 10^n$ , где $n = -6 \div 0$	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^7$	$\pm 0,2 \% + 3 \cdot 10^{-10}$ Гн - при частотах 1 - 10 кГц; $\pm 0,3 \% + 3 \cdot 10^{-10}$ Гн - при частотах 30 — 10 <sup>3</sup> кГц	-
P547	Образцовые меры индуктивности 2-го и 3-го разрядов	$1 \cdot 10^{-4} - 1$	$40 - 2 \cdot 10^4$	$\pm (0,02 - 0,1)$	$\pm 0,1$
КИ-5	Образцовые меры индуктивности 1, 2 и 3-го разрядов	$1 \cdot 10^{-4} - 1$	$50 - 2 \cdot 10^4$	$\pm (0,01 - 0,1)$	
EI-10	Образцовые меры индуктивности 2 и 3-го разрядов	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8$	$\pm (0,3 - 2)$	-
L-0672-1	Набор образцовых высокочастотных мер индуктивности 1 и 2-го разрядов	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8$	-	$\pm (0,1 + 10^{-8}/L)$ ; $\pm (0,2 + 2 \cdot 10^{-8}/L)$ , где $L$ - значение индуктивности, Гн
L-1279-2	Набор образцовых мер индуктивности 2-го разряда	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^7$	$\pm (0,08 - 0,5)$	$\pm (0,2 + 10^{-1}/L)$ , где $L$ - индуктивность, мкГн



Тип меры	Назначение	Номинальные значения индуктивности, Гн	Диапазон частот, Гц	Погрешность аттестации меры, %	Предел допускаемой основной погрешности, %
1	2	3	4	5	6

Продолжение таблицы П.3

1	2	3	4	5	6
L-0170-2	Набор образцовых мер индуктивности 3-го разряда	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^7$	$\pm (0,2 + 10^{-1}/L)$	$\pm (0,2 + 10^{-1}/L)$ , где $L$ - индуктивность, мкГн
P5101-P5115	Образцовые меры индуктивности	$1 \cdot 10^{-6} - 1$	$80 - 1 \cdot 10^5$	$\pm (0,01 - 0,4)$	$\pm (0,02 - 2)$
P5009	Образцовые катушки взаимной индуктивности	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$	$\pm 0,1$ - при частотах 1 - 10 кГц; $\pm 0,2$ - при частотах 30 и 50 Гц	$\pm 0,1$ ; фазовая погрешность $3 \cdot 10^{-3}$ рад
P536	Меры взаимной индуктивности	$1 \cdot 10^{-3}$ ; $1 \cdot 10^{-2}$	$10^4$	-	$\pm 0,2$
P567	Магазин индуктивности	$0-1,11 \cdot 10^{-1}$	$20 - 2,5 \cdot 10^3$	-	$\pm 0,2 (1 + 0,4/L)$ , где $L$ - включенная индуктивность, мГн
P594	Магазин индуктивности высокочастотный	$1 \cdot 10^{-7} - 1,111 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^6$	-	$\pm (1 + 0,4/L)$ , где $L$ - включенная индуктивность, мГн
P5085	Магазин индуктивности кодоуправляемый	$2 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^3$	$50; 1 \cdot 10^3$ ; $1 \cdot 10^4$	$\pm (0,05 - 0,2)$	$\pm (0,1 - 1)$
P5000	Магазин взаимной индуктивности	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^3$ ; $1 \cdot 10^4$	-	$\pm 0,2 (1 + 0,044/M)$ , где $M$ - включенная взаимная индуктивность, мГн; фазовая погрешность $3 \cdot 10^{-3}$ рад

## СОДЕРЖАНИЕ

Вступление.....	3
1. Классификация компонентов цепей с сосредоточенными параметрами.....	4
1.1. Общие сведения.....	4
1.2. Характеристики электрических конденсаторов.....	8
1.3. Характеристики индуктивностей.....	12
2. Основные методы измерения параметров $RLC$ .....	17
2.1. Общие сведения.....	17
2.2. Метод вольтметра-амперметра.....	19
2.3. Резонансные методы.....	26
2.4. Мостовые методы.....	37
2.5. Другие методы измерения $RLC$ .....	51
3. Лабораторный практикум по измерению параметров $RLC$ .....	59
3.1. Общие сведения.....	59
3.2. Измерение параметров $RLC$ при помощи универсального измерителя типа Е7-11.....	59
3.3. Практическая работа с прецизионными мостами переменного тока типа ВМ400Г и ВМ401Е.....	67
3.4. Измерение параметров $RLC$ при помощи универсального измерителя типа Е7-8.....	73
3.5. Измерение параметров $RLC$ при помощи универсального измерителя типа Е7-12.....	79
3.6. Практическая работа с мостом переменного тока Р5058.....	85
3.7. Практическая работа с мостом переменного тока Р5016.....	91
3.8. Практическая работа с измерителем добротности ВМ560.....	93
4. Задачи по расчету параметров $RLC$ .....	104
Список источников информации.....	120
Приложение.....	121

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Навчальне видання

ГОРКУНОВ Борис Митрофанович  
ЛЬВОВ Сергій Геннадійович  
ТИЩЕНКО Анна Анатоліївна

## **ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ**

Навчальний посібник

Відповідальний за випуск проф. *Г.М. Сучков*

Роботу рекомендував до видання *В.В. Воїнов*

В авторській редакції

План 2014 р., поз. 188

Підп. до друку 04.06.2014. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 7,4.

Наклад 100 прим. Зам. № 191. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №3657 від 24.12.2009 р.

---

Друкарня НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21